

أشباه الموصلات

دكتور

حسن حسين حسن

دكتور

شريف أحمد خيرى



سلسلة الفكر العربي
لمراجع العلوم الأساسية

- ١٦ -

أشباه الموصلات

دكتور مهندس

حسن حسين حسن

استاذ مساعد بالمعهد العالي للتكنولوجيا ببها

دكتور

شريف أحمد خيرى

استاذ الفيزياء بكلية العلوم - جامعة القاهرة

الطبعة الأولى

١٤٢٢هـ / ٢٠٠٢م

ملتزم الطبع والنشر

دار الفكر العربي

٩٤ شارع عباس العقاد - مدينة نصر - القاهرة

ت ٢٧٥٢٩٨٤ ، فاكس ٢٧٥٢٧٣٥

www.darelfikrelarabi.com

INFO@darelfikrelarabi.com

٥٣٧، ٦٢٢ شريف أحمد خيرى.
ش ر اش أشباه الموصلات/ شريف أحمد خيرى، حسن حسين
حسن. - القاهرة: دار الفكر العربى، ٢٠٠٢ م.
٤٣٠ ص : إيض ، ٢٤ سم. - (سلسلة الفكر العربى
لمراجع العلوم الأساسية؛ ١٦)
بيليو جرافية : ص ٤٠٥ - ٤٠٦ .
يشتمل على كشاف بالمصطلحات.
يشتمل على ملاحق.
تدمك : ٤ - ١٤٣٣ - ١٠ - ٩٧٧ .
١ - الفيزياء . ٢ - الإلكترونيات . ١ - حسن حسين حسن ،
مؤلف مشارك . ب - العنوان . ج - السلسلة .

تصميم وإخراج فنى

منى جامعة عمارة

&

ثريا إبراهيم حسين



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقديم السلسلة

الحمد لله رب العالمين.. خلق الإنسان، علّمه البيان،
والصلاة والسلام على أشرف المرسلين، سيدنا محمد النبي الأمي العربي الصادق
الأمين، وعلى آله وصحبه والتابعين بإحسان إلى يوم الدين.
أما بعد،

فإن اللغة - أي لغة - هي وسيلة التواصل الفكرى بين أبناء الأمة الواحدة، وهي
فى الوقت نفسه تمثل حاجة ملحة، وضرورة لا غنى عنها لكل أمة تشرع فى النهوض
من كبوتها وتسعى إلى اللحاق بركب الحضارة، مؤمنة بالدور الأساسى للعلوم الأساسية
والتطبيقية والتقنية فى صنع التقدم والرفق.

هذه الحقيقة التاريخية استوعبها علماء الحضارة العربية الإسلامية عندما ترجموا
معارف السابقين إلى اللغة العربية، واستوعبها أيضا الغربيون عندما ترجموا علوم
الحضارة العربية الإسلامية فى أوائل عصر النهضة الأوروبية الحديثة، وتعيها اليوم كل
الأمم التى تدرس العلوم بلغاتها الوطنية، فى سعى حثيث نحو المشاركة الفعالة فى إنتاج
المعرفة وتشيد صرح الحضارة المعاصرة.

ولقد أضحى أمر تعريب العلم والتعليم ضرورة من ضرورات النهضة العلمية
والتقنية التى تشهدها أمتنا العربية الإسلامية لكى تستأنف مسيرتها الحضارية بلغة القرآن
الكريم الذى حفظها قوية حية فى النفوس على الرغم من الوهن الذى أصاب أهلها،
وما ذلك إلا لأن الله - سبحانه وتعالى - قد خصّها بصفات تميزها على غيرها، وكفّلها
بحفظه حين تكثّل بحفظ قرآنه العظيم.

والحديث عن هذه الضرورة الحضارية لتعريب العلم والتعليم قد تجاوز الآن مرحلة
الإقناع بالأدلة والبراهين المستقاة من حقائق التاريخ ومعطيات الواقع المعاش، وعليه أن
ينتقل إلى مرحلة التخطيط والتنفيذ، وفق أسس وضمانات منهجية مدروسة، وعن طريق
آليات ومؤسسات قادرة على إنجاز المشروع الحضارى الكبير؛ ذلك أن اجتياز حالة
التخلف العلمى والتقنى التى تعيشها الأمة العربية والإسلامية يجب أن يصبح هدفا
عزيزا تستحث لأجله الهمم، وتستثار العزائم.

مختار الفكر العربي - من جانبها - قد استشعرت خطورة تأخير هذا المشروع الحضارى الكبير، فسعت جاهدة إلى تحقيق الهدف النبيل، وشرعت فى إعداد «سلسلة مراجع العلوم الأساسية» فى مجالات الكيمياء والفيزياء والرياضيات والفلك والجيولوجيا وعلوم الحياة، بحيث تخاطب قارئ العلوم فى مراحل العمر المختلفة بصورة عامة، وطلاب المرحلتين الثانوية والجامعية على وجه الخصوص، فى ضوء الاهداف الآتية:

* ربط المادة العلمية بما يدرسه الطلاب فى مناهجهم الدراسية، وعرضها على نحو يوافق التصور الإسلامى للمعرفة، ويحقق أهداف وغايات التربية الإسلامية الرشيدة.

* إثراء الثقافة العلمية لدى الطلاب والارتقاء بذوقهم العلمى مع تنمية الجانب التجريبى والتطبيقى لتعويدهم حسن الاستفادة من كل ملكات الفكر والعمل التى وهبها الله - سبحانه وتعالى - للإنسان.

* إبراز الدور الرائد الذى قام به علماء الحضارة العربية الإسلامية - قديما وحديثا - فى دفع مسيرة التقدم العلمى.

* تتبع نمو المفاهيم العلمية وصولا إلى أحدث الكشوف والمخترعات، وذلك بهدف غرس منهجية التفكير العلمى لدى الطلاب، وتوسيع مداركهم إلى أبعد من حدود الموضوعات الدراسية المقررة عليهم.

* الالتزام بما أقرته مجامع اللغة العربية من مصطلحات علمية، ويفضل أكثرها شيوعا مع ذكر المقابل الأجنبى.

وقد عهدت **مختار الفكر العربى** بالمسئولية العلمية إلى هيئة استشارية تتولى التخطيط لإصدارات هذه السلسلة، واستكتاب أهل الخبرة والاختصاص من علماء الأمة ومفكرىها، ومناقشة الأعمال المقدمة قبل صدورها.

﴿رَبَّنَا لَا تُزِغْ قُلُوبَنَا بَعْدَ إِذْ هَدَيْتَنَا وَهَبْ لَنَا مِنْ لَدُنْكَ رَحْمَةً إِنَّكَ أَنْتَ الْوَهَّابُ﴾ [آل عمران].

وأخر دعوانا أن الحمد لله رب العالمين

أحمد فؤاد باشا

اللجنة الاستشارية لسلسلة الفكر العربي

مراجع العلوم الأساسية

- أ. د أحمد فؤاد باشا استاذ الفيزياء وعميد كلية العلوم . جامعة القاهرة (رئيس اللجنة
وعضو الجمع العلمي المصري.
- أ. د محمد عبد الفتاح القصاص استاذ علم النبات . علوم القاهرة ، وخبير البيئة العالي
وعضو الجمع العلمي المصري.
- أ. د عبد الحافظ حلمي محمد عميد علوم عين شمس الأسبق ،
وأستاذ البيولوجيا وعضو مجمع اللغة العربية.
- أ. د أحمد مدحت إسلام استاذ الكيمياء . العميد الأسبق لعلوم الأزهر .
أ. د على على المرسى استاذ علم الحشرات . جامعة القاهرة . عضو المجمع
العلمي المصري.
- أ. د الإمام عبده قبية استاذ علم النبات . ووكيل كلية العلوم جامعة القاهرة
لشئون الدراسات العليا والبحوث سابقا .
- أ. د أحمد مختار أبو خضرة استاذ الجيولوجيا ، ووكيل كلية العلوم جامعة القاهرة
لشئون التعليم والطلاب.
- أ. د محمد أمين سليمان استاذ الفيزياء . علوم القاهرة .
أ. د عبد الشافي فهمي عبادة استاذ ورئيس قسم الرياضيات . علوم الأزهر .
أ. د محمد أحمد الشهاوى رئيس قسم الفلك والأرصاد الجوية . جامعة القاهرة .
أ. د شريف أحمد خيرى استاذ قسم الفيزياء . علوم القاهرة .

مدير التحرير: الكيمياءى: أمين محمد الخضرى

المهندس: عاطف محمد الخضرى

سكرتير اللجنة: أ. عبد الحليم إبراهيم عبد الحليم

جميع المراسلات والاتصالات على العنوان التالى:

دار الفكر العربى

سلسلة الفكر العربى لمراجع العلوم الأساسية

٩٤ شارع عباس العقاد - مدينة نصر - القاهرة

ت: ٢٧٥٢٩٨٤ - فاكس: ٢٧٥٢٧٣٥

www.darelfikrelarabi.com

INFO@darelfikrelarabi.com

بسم الله الرحمن الرحيم

المقدمة

بسم الله الرحمن الرحيم، الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على أشرف المرسلين وعلى آله وصحبه أجمعين وبعد.

حققت صناعة أشباه الموصلات في العقدين السابقين نموا طوريا غير مسبوق، جعلها الصناعة الأكبر بين كافة الصناعات الأخرى عالميا. وأصبحت هذه الصناعة هي القاطرة التي تقود قطاع التكنولوجيا المتقدمة (High-Tec) في الاقتصاد العالمي. ولم تنل الأمة العربية نصيبها من هذه الصناعة الإستراتيجية. ويمكنها أن تشارك فيها بقوة، إذا توفّر لديها الحريج المتدرب تكنولوجيا على مستوى عال بالمعايير الدولية. فوحدة الإنتاج لأشباه الموصلات والتي تسمى بالفاب (FAB) تتطلب نمطيا استثمارا في حدود مليار أو أكثر من الدولارات وتوظف حوالى مائة فنى متخصص، مستوى تدريبهم التكنولوجى يصل إلى درجة ماجستير، وإنتاجية الشخص الواحد سنويا حوالى مليون دولار ومتوسط راتبه السنوى مائة ألف دولار. وتنتشر هذه الوحدات ليس فقط بأمريكا واليابان ولكن في دول أخرى صغيرة مثل ماليزيا وإسرائيل وذلك باستثمارات أجنبية.

إذن مطلوب بشدة أن تُرغّب العديد من شباب أمتنا العربية في أن ينهلوا من موارد هذه الثقافة التكنولوجية الحديثة وأن يزداد نصيب مكتباتنا العربية من المراجع التكنولوجية باللغة العربية جنبا إلى جنب مع المراجع الأجنبية، ومن هنا يجرى دور هذا الكتاب كإضافة للمكتبة التكنولوجية العربية.

وحين فكرنا في إعداد هذا الكتاب استعرضنا عددا من المراجع ففى هذا المجال واسترعى انتباهنا مرجعين هما «أساسيات نبائط أشباه الموصلات» لمؤلفه R. P. Pierret المنشور عام 1996 والآخر هو «الفيزياء الأساسية لنبائط أشباه الموصلات» لمؤلفه J. Parker، والمنشور عام 1994. استخدم هذين الكتابين كمرجعين لتدريس أشباه الموصلات لطلاب الفيزياء والهندسة الكهربائية ببعض المعاهد والكليات المصرية. المرجع الأول (بيير) هو أساس الفصول الأربعة الأولى للكتاب. ويتم استخدامه في عدد من الجامعات الأمريكية كمرجع أساسى كما اتفصح لنا عند تصفح مواقع هذه الجامعات على الشبكة العنكبوتية بالإنترنت.

الفصول الأربعة الأخيرة من كتابنا خصصت لتطبيقات أشباه الموصلات، فيما يعرف بالنبائط Devices وأساس هذه الفصول هو المرجع الثانى (باركر) الذى يمتاز عن

غيره بالعرض الفيزيائي المتميز والموجز لطريقة عمل الناباط الرئيسية وبما يشتمله من الأمثلة العديدة المفيدة .

تنظيم هذا الكتاب يسير على النحو التالي: يعرض الفصل الأول التصنيفات والتركيبات البلورية لأشباه الموصلات ويلها كيفية تصنيع بلورة سليكون فائقة النقاء . ويتناول الفصل الثاني نمودجين لحاملات الشحنة: الروابط ونطاق الطاقة وكيفية حساب أعداد حاملات الشحنة بشبه الموصل . ويختص الفصل الثالث بفاعليات حاملات الشحنة من تيار انسياق وتيار انتشار وعمليات توليد والتثام الحاملات . ثم تدمج كل هذه الفاعليات فيما يسمى بمعادلة الحالة، وتناقش بعض حلول هذه المعادلة الهامة . والفصل الرابع وصفي تماما ويمكن تكليف الطلاب بقراءته اعتمادا على أنفسهم فقط، ويتناول هذا الفصل العمليات الأساسية المستخدمة في تصنيع نيطة شبه موصل . ويتعرض الفصل الخامس لأساسيات الوصلة pn والتي تشكل اللبنة الأساسية لعدد من الناباط . من بين كل الناباط يوجد حصانان يقومان بمعظم العمل وهما الترانزيستور الثنائي القطبية وترانزيستور تأثير المجال . الفصل السادس يستعرض بناء وكيفية عمل ترانزيستور الثنائي القطبية في أنماط العمل المختلفة مع ربط أداء هذا الترانزيستور مع الخصائص الفيزيائية لمادة شبه الموصل بداخله . بعد دراسة ثنائي MOS، يستخدم الفصل السابع هذه الدراسة لفهم عمل الترانزيستور MOSFET وهو النيطة الأكثر شيوعا بين كل الناباط كافة . نوقش مفهوم تصغير أبعاد هذا الترانزيستور، عمليات التصغير تؤدي إلى وضع ملايين الترانزيستورات على مساحة لا تتعدى مساحة طابع برید . أما الفصل الثامن والآخر فيتناول عددا من ناباط الإلكترونيات البصرية مثل ثنائي باعث الضوء LED والكواشف البصرية فالحلية الشمسية وأخيرا ثنائي الليزر .

نسأل الله العلى القدير أن يجعل هذا العمل نافعا ونأمل أن يوجهنا القارئ الكريم لأى ملاحظة يرى إضافتها لهذا الكتاب بالاتصال عبر أحد عناوين البريد الإلكتروني التالية :

hhh @ menanet.net

khairysh @ hotmail.com

هذا، وبالله التوفيق - وآخر دعوانا أن الحمد لله رب العالمين .

شريف خيرى
حسن حسين
سبتمبر ٢٠٠١

المحتويات

الفصل الأول

أشباه الموصلات - مقدمة عامة

١٧	(١-١) الخواص العامة لمادة شبه الموصل
١٧	١-١-١ التركيب
١٩	١-٢-١ النقاء
٢١	(٢-١) بنية البلورة
٢١	٢-٢-١ مفهوم الطاقة الوحيدة
٢٢	٢-٢-١ خلايا وحدة ثلاثية الأبعاد بسيطة
٢٤	٢-٢-١ شبكات أشباه الموصلات
٣١	(٣-١) نمو البلورة
٣١	١-٢-١ الحصول على السيليكون الفائق النقاء
٣٣	٢-٢-١ تكوين البلورة المفردة
٣٣	(٤-١) ملخص
٣٥	استئلة الفصل

الفصل الثاني

نمذجة حاملات الشحنة الكهربائية

٤١	(١-٢) مفهوم الكمومية
٤٤	(٢-٢) نماذج شبه الموصل
٤٤	١-٢-٢ نموذج الروابط
٤٥	٢-٢-٢ نموذج نطاق الطاقة
٤٩	٢-٢-٢ حاملات الشحنة الكهربائية
٥١	٤-٢-٢ فجوة النطاق وتصنيف المواد
٥٢	(٣-٢) خواص حاملات الشحنة الكهربائية
٥٢	١-٢-٢ الشحنة
٥٢	٢-٢-٢ الكتلة الفعالة

٥٥	٢-٢-٢ أعداد حاملات الشعنة في المواد الذاتية
٥٦	٢-٢-٤ منابذة أعداد الحاملات - الإشابة
٦٢	٢-٢-٥ مصطلحات متعلقة بالحاملات
٦٣	(٢-٤) توزيعات الحالات والحاملات
٦٣	٢-٤-١ كثافة الحالات
٦٥	٢-٤-٢ دالة فرمي
٦٩	٢-٤-٢ توزيع الاتزان للحاملات
٧٢	(٢-٥) تركيزات حاملات الشعنة عند الاتزان
٧٢	٢-٥-١ صيغ رياضية لقيم n و p
٧٦	٢-٥-٢ تعبيرات بديلة لقيم n و p
٧٧	٢-٥-٢ n و حاصل ضرب np
٧٩	٢-٥-٤ علاقة تعادل الشعنة
٨٠	٢-٥-٥ حسابات تركيزات الحاملات
٨٣	٢-٥-٦ تحديد E_F
٨٧	٢-٥-٧ تغير تركيز الحاملات مع درجة الحرارة
٩٠	(٢-٦) ملخص وملاحظات ختامية
٩٢	استئلة الفصل

الفصل الثالث

حاملات الشعنة

٩٧	(٢-١) الانسياب
٩٧	٢-١-١ الانسياب - تعريف وتصوير
٩٩	٢-١-٢ تيار الانسياب
١٠١	٢-١-٢ الحركة (الانتقالية)
١٠٥	٢-١-٤ المقاومة
١١٠	٢-١-٥ إنتهاء (الحناء) التطلقات
١١٥	(٢-٣) الانتشار
١١٥	٢-٣-١ تعريف وتصوير

١١٩	٢-٢-٢ القياس في مجس النقطة الساخنة
١٢٠	٢-٢-٢ الانتشار والتيار الكلي
١٢١	٢-٣-٢ ربط معاملات الانتشار بالمركبات
١٢٦	(٢-٢) الالتئام - التوليد
١٢٦	١-٢-٢ تعريف وتصوير
١٣٠	٢-٢-٢ اعتبارات كمية الحركة
١٣٣	٢-٢-٢ إحصائيات $R-G$
١٤٠	٤-٢-٢ أعمار العائلات الألفية
١٤٤	(٤-٢) معادلات الحالة
١٤٤	١-٤-٢ معادلات الاتصال
١٤٦	٢-٤-٢ معادلات انتشار العائلات الألفية
١٤٨	٢-٤-٢ حالات خاصة - تبسيطات - حلول
١٥٠	٤-٤-٢ حل المسائل
١٥٧	(٥-٢) مفاهيم إضافية
١٥٧	١-٥-٢ أطوال الانتشار
١٥٨	٢-٥-٢ أشباه مستوى فرمي
١٦٢	(٦-٢) ملخص وملاحظات ختامية
١٦٥	مسائل على الفصل الثالث

الفصل الرابع

أساسيات تصنيع النباهات

١٧٥	(١-٤) مقدمة
١٧٥	(٢-٤) عمليات التصنيع
١٧٥	١-٢-٤ الأكسدة
١٧٩	٢-٢-٤ الانتشار
١٨٢	٢-٢-٤ الفرس الأيونى
١٨٦	٤-٢-٤ النقش الليثوجرافى (الحجرى)
١٩٠	٥-٢-٤ ترسيب الطبقات الدقيقة
١٩٤	(٢-٤) الوصلة pn كمثال لتصنيع النباهات

الفصل الخامس الوصلة الثنائية

١٩٩	- مقدمة
٢٠٠	(١-٥) الوصلة pn عند الاستقرار الحرارى
٢٠٨	(٢-٥) ارتفاع حاجز جهد الوصلة pn
٢١١	(٣-٥) تقريب النضوب والمجال الكهربى والجهد
٢١٦	(٤-٥) الصيغ الرياضية لعناصر الوصلة
٢٢١	(٥-٥) الوصلة pn المثبوتة أحادية الجانب
٢٢٣	(٦-٥) تطبيق جهد انحياز على الوصلة pn
٢٢٩	(٧-٥) التفسير الكيفى للانحياز الأمامى
٢٣٠	(٨-٥) المعادلة المثلى للثنائى
٢٣٩	(٩-٥) الانهيار العكسى
٢٤٣	(١٠-٥) سعة النضوب
٢٤٦	(١١-٥) ملخص الفصل
٢٤٨	أسئلة الفصل

الفصل السادس الترانزستور ثنائى القطب

٢٥١	- مقدمة
٢٥١	(١-٦) توصيل النبيلة
٢٥١	(٢-٦) مفاهيم أولية
٢٥٩	(٣-٦) أساسيات الترانزستور
٢٦١	(٤-٦) موسعة الانتشار
٢٦٤	(٥-٦) مركبات التيار
٢٦٥	(٦-٦) وسائط (بارامترات) الترانزستور
٢٦٧	(٧-٦) معامل كفاءة الباعث
٢٦٨	(٨-٦) عامل نقل القاعدة
٢٧٤	(٩-٦) النبيلة BJT فى الترددات العالية
٢٧٧	(١٠-٦) الاختراق الكلى

٢٨١	(١١.٦) أنماط (صيف) التشغيل
٢٨١	١١-٦ النمط التشط
٢٨١	٢-١١-٦ نمط التشبع
٢٨١	٣-١١-٦ نمط القطع
٢٨١	٤-١١-٦ النمط المعكوس
٢٨٤	(١٧.٦) تحسين كسب التيار
٢٨٤	١٧.٦ الوصلات غير المتجانسة
٢٨٦	١٧.٦ الباعث متعدد التبلور
٢٩٢	(١٢.٦) الإلكترونات الدقيقة المفرغة
٢٩٤	(١٤-٦) ملخص الفصل
٢٩٥	أسئلة الفصل

الفصل السابع النبیطة (فلز - أكسيد فلز - شبه موصل)

٢٩٩	- مقدمة
٣٠٠	(١-٧) أثر جهد الانحياز
٣٠١	(أ) النضوب
٣٠٣	(ب) الانقلاب
٣٠٣	(ج) التكدس
٣٠٤	(٧-٧) أشكال نطاق الطاقة في نبیطة (MOS)
٣١١	(٢-٧) ترانزستور تأخير المجال (MOSFET)
٣١٤	(٤-٧) المنحنیات الممیزة لنبیطة (MOSFET)
٣١٤	١-٤-٧ التحلیل النوعی للمنحنیات للممیزة
٣١٨	٢-٤-٧ التحلیل الكمی للمنحنیات الممیزة
٣٢٣	(٥-٧) نمط النضوب في نبیطة (MOSFET)
٣٢٦	(٦-٧) الأبعاد القیاسیة للنبیطة
٣٢٨	(٧-٧) ترانزستور تأخير المجال الوصلی (JFET)
٣٣١	(٨-٧) معادلات النبیطة (JFET)
٣٣٧	(٩-٧) ملخص الفصل
٣٣٨	أسئلة الفصل

الفصل الثامن الإلكترونيات البصرية

- مقدمة

٣٤٢	(١-٨) الثنائي الباعث للضوء
٣٤٦	(٢-٨) المواد اللازمة لتصنيع الثنائي الباعث للضوء
٣٤٩	(٣-٨) المواد المستخدمة في التبيطات LEDs للضوء المرئي
٣٥٥	(٤-٨) الكواشف الضوئية الوصلية
٣٦٣	(٥-٨) الموصل الضوئي
٣٦٦	(٦-٨) الترانزيستور الضوئي
٣٦٨	(٧-٨) كسب الموصلية الضوئية
٣٧٠	(٨-٨) الخلية الشمسية
٣٧٨	(٩-٨) السيليكون الأمورفي والخللايا الشمسية
٣٧٩	(١٠-٨) هياكل الخلايا الشمسية
٣٧٩	١-١٠-٨ خلايا حاجز شوتكي
٣٧٩	٢-١٠-٨ وصلات np ووصلات p-n
٣٧٩	٣-١٠-٨ خلايا الوصلات غير المتجانسة
٣٨٢	(١١-٨) أشباه الموصلات والليزر
٣٨٤	(١٢-٨) تهيئة الإسكان العكسي
٣٨٨	(١٣-٨) ليزر الوصلة المتجانسة
٣٩١	(١٤-٨) ليزر الوصلة غير المتجانسة
٣٩٣	(١٥-٨) الليزر الشريطي
٣٩٥	(١٦-٨) ليزر الوصلة غير المتجانسة المدهونة
٣٩٧	(١٧-٨) ملخص الفصل
٣٩٨	أسئلة الفصل

الفصل الأول

أشباه الموصلات - مقدمة عامة

SEMICONDUCTORS

GENERAL INTRODUCTION

(١-١) الخواص العامة لمادة شبه الموصل

(٢-١) بنية البلورة

(٣-١) نمو البلورة

(٤-١) ملخص

أسئلة الفصل

(١-١) الخواص العامة لمادة شبه الموصل

General Semiconductor Material Properties

لم يعد يخفى على أحد أن الغالبية العظمى من نباتات الحالة الجامدة الموجودة بالأسواق في هذا العصر يتم تصنيعها من مواد يقال لها أشباه الموصلات؛ ولذا فمن البديهي أن نستهل هذا الكتاب باستعراض الطبيعة العامة للمواد شبه الموصلة.

١-١-١ التركيب Composition

يحتوي الجدول (١-١) قائمة بالتركيب الكيميائي لأشباه الموصلات التي قد يجيء ذكرها في أدبيات النباه.

نلاحظ أن عائلة أشباه الموصلات تحوى العناصر المفردة مثل: السيليكون Si والجرمانيوم Ge، والمركبات مثل: GaAs (زرنيخيد الجاليوم)، و ZnSe (سيلينيد الزنك)، وكذلك السبائك مثل: $Al_xGa_{1-x}As$ (العدد x فى صيغة السبيكة - وأحيانا y- عبارة عن كسر محصور بين الصفر والواحد ويساوى نسبة العنصر فى السبيكة مقاسا بالمول). يعتبر السيليكون شبه الموصل الأكثر أهمية على الإطلاق، ويعود ذلك أساسا للتطور الهائل فى تقنية صناعته، ويدخل فى تصنيع السواد الأعظم من النباه سواء المفردة منها أو ما بداخل الدارات المتكاملة (ICs) التى هى عماد الأجهزة الإلكترونية مثل الكمبيوتر والتلفزيون. أو دوائر التحكم بالإشعاع فى السيارات الحديثة. أما زرنيخيد الجاليوم GaAs الذى يتألق من حيث خفة انتقال الإلكترونات داخله أو من ناحية خواصه الضوئية فيستخدم فى صناعة الدارات المتكاملة فائقة السرعة ودبوبات (ثنائيات) الليزر. وتستخدم باقى أشباه الموصلات فى تطبيقات خاصة مثل تلك المرتبطة بالسرعة العالية أو بدرجة الحرارة العالية أو بالبصريات الإلكترونية. وسنركز أساسا فى هذا الكتاب على السيليكون؛ لأنه شبه الموصل الأكثر شيوعا فى صناعة أشباه الموصلات ويلىه فى ذلك زرنيخيد الجاليوم.

بالرغم من أن قائمة أشباه الموصلات تبدو كبيرة إلا أنها فى الحقيقة تعتبر محدودة بالقياس بالقائمة الكاملة للعناصر والمركبات، فإذا نظرنا للجزء الخاص بأشباه الموصلات فى الجدول الدوري للعناصر (جدول ١-٢) سنجد أن مجموعة معينة من العناصر ومركبات من عناصر معينة هى التى تعتبر أشباه موصلات. من الجدولين ١، ٢ نجد أنه يوجد عنصران فقط يميلان كإشباه موصلات: السيليكون، والجرمانيوم، وهما من العمود الرابع والباقي مركبات إما لعناصر من العمود الثالث مع الخامس مثل GaAs وتسمى مركبات III-V أو مركبات لعناصر من العمود الثانى مع السادس مثل ZnS

جدول (1-1) مواد أشباه الموصلات

Table 1.1 Semiconductor Materials.

General Classification	التصنيف	Symbol	الرمز	Name	الاسم
(1) Elemental		Si		Silicon	المناصر
		Ge		Germanium	
(2) Compounds					
(a) IV-IV	SiC		Silicon carbide	المركبات
(b) III-V	AlP		Aluminum phosphide	
		AlAs		Aluminum arsenide	
		AlSb		Aluminum antimonide	
		GaN		Gallium nitride	
		GaP		Gallium phosphide	
		GaAs		Gallium arsenide	
		GaSb		Gallium antimonide	
		InP		Indium phosphide	
		InAs		Indium arsenide	
		InSb		Indium antimonide	
(c) II-VI	ZnO		Zinc oxide	
		ZnS		Zinc sulfide	
		ZnSe		Zinc selenide	
		ZnTe		Zinc telluride	
		CdS		Cadmium sulfide	
		CdSe		Cadmium selenide	
		CdTe		Cadmium telluride	
		HgS		Mercury sulfide	
(d) IV-VI	PbS		Lead sulfide	
		PbSe		Lead selenide	
		PbTe		Lead telluride	
(3) Alloys					السبائك
(a) Binary	Si _{1-x} Ge _x			ثنائية
(b) Ternary	Al _x Ga _{1-x} As		(or Ga _{1-x} Al _x As)	ثلاثية
		Al _x In _{1-x} As		(or In _{1-x} Al _x As)	
		Cd _{1-x} Mn _x Te			
		GaAs _{1-x} P _x			
		Ga _x In _{1-x} As		(or In _{1-x} Ga _x As)	
		Ga _x In _{1-x} P		(or In _{1-x} Ga _x P)	
		Hg _{1-x} Cd _x Te			
(c) Quaternary	Al _x Ga _{1-x} As _y Sb _{1-y}			رباعية
		Ga _x In _{1-x} As _y P _{1-y}			

جدول (١-٢) الجزء الخاص بأشباه الموصلات
في الجدول الدوري للعناصر

دورة	عمود				
Period	Column II	III	IV	V	VI
2		B بورون Boron	C كربون Carbon	N نتروجين Nitrogen	
3	Mg مغنسيوم Magnesium	Al ألومنيوم Aluminum	Si سيليكون Silicon	P فوسفور Phosphorus	S كبريت Sulfur
4	Zn زنك Zinc	Ga جاليوم Gallium	Ge جيرانيوم Germanium	As آرسين Arsenic	Se سيلينيوم Selenium
5	Cd كاديوم Cadmium	In إنديوم Indium	Sn قصدير Tin	Sb أنتيمون Antimony	Te تيلور Tellurium
6	Hg زئبق Mercury		Pd رصاص Lead		

وتسمى مركبات II-VI، ويوجد مركب شبه موصل وحيد لعنصرين من العمود الرابع إلا وهو كربيد السيليكون SiC، ويلاحظ في المركبات التي ذكرناها إلى الآن أن مجموع عمودي عنصري المركب يساوي 8. غير أن هناك استثناء لهذه القاعدة في المركبات من عنصر الرصاص (العمود الرابع) مع عناصر من العمود الخامس مثل كبريتيد الرصاص PbS، وسيلينيد الرصاص PbSe وتيلوريد الرصاص PbTe وتسمى هذه المجموعة بالمركبات IV-VI. بالإضافة للعناصر والمركبات المذكورة توجد مجموعة ثالثة تسمى بالسبائك شبه الموصلة. تتكون السبيكة من نوعين مختلفين من بعض أشباه الموصلات التي سبق ذكرها، مثلاً، السبيكة المكونة من AlAs و GaAs (وهما مركبات III-V) تسمى بالسبيكة $Al_xGa_{1-x}As$ وفيها نسبة عدد ذرات الألومنيوم إلى عدد ذرات الجاليوم هي x إلى 1-x.

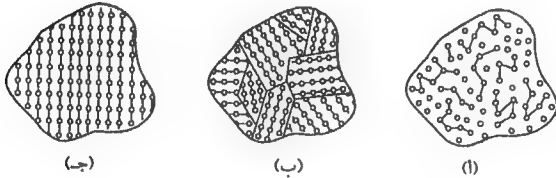
١-٢-٢ النقاة Purity

سنعرف في الفصل الثاني أن إضافة آثار ضئيلة من ذرات شائبة ما إلى شبه الموصل ستؤدي إلى تغيرات هائلة بالخواص الكهربائية للمادة (تسمى هذه العملية بالإشابة أو التطعيم - Doping)؛ لهذا السبب يجب التحكم بدقة متناهية في نقاء مكونات أشباه الموصلات، وليس مستغرباً أن ندرك بأن معرفة الإنسان بأشباه الموصلات هي حديثة نسبياً ولم تنطلق إلا بعد أن تعلم الإنسان كيفية تصنيع أشباه الموصلات بنقاء عالٍ

جدا فى النصف الثانى من القرن العشرين . وتعتبر أشباه الموصلات الحديثة هى أنقى المواد المعروفة على الإطلاق، فمثلا فى سيليكون النبائط الحديثة نسبة الشوائب الطبيعية غير المتعمدة لا تتجاوز عادة ذرة واحدة لكل ألف مليون ذرة (وهى نفس النسبة بين مجموعة من خمسة أشخاص فقط إلى مجموع سكان العالم بأكمله). يجب أن نؤكد هنا أن هذه النسبة للشوائب غير المتعمدة، أما الشوائب التى تضاف عن قصد فتتراوح النسبة بين ذرة شائبة لكل 10^8 ذرة سيليكون إلى ذرة شائبة لكل ألف ذرة سيليكون، والقصد من هذه الإضافة هى التحكم فى الخواص الكهربية للسيليكون على النحو الذى سيتم تفصيله فيما بعد.

١-١-٢ البنية Structure

يلعب الترتيب الفراغى لمواضع الذرات داخل المادة دورا هاما فى تحديد الخواص الدقيقة لهذه المادة. وكما هو موضح بالشكل (١-١)، فإن ترتيب الذرات داخل الجوامد يمكن أن يصنف كاحد ثلاثة أصناف: لابلورى Amorphous، متعدد البلورة Polycrystalline، أو بلورى Crystalline. فى حالة الجامد اللابلورى لا يمكن التعرف على ترتيب منتظم للذرات وتكون مواضعها عشوائية ولا تخضع لترتيب معين، بينما لمجد ترتيب الذرات فى المادة البلورية محكما حيث تصطف الذرات فيها بانتظام فى ثلاثة أبعاد. ويتكرر ترتيب الذرات بمقطع ما، فى كل المقاطع الأخرى على طول البلورة بطريقة دورية.



شكل (١ ١) التصنيف العام للمواد طبقا للترتيب الذرى

(١) أمورفية - لا تعرف على ترتيب بعيد المدى للذرات.

(ب) متعددة البلورة - الترتيب كامل داخل الحبيبات فقط.

(ج) متبلورة - جميع ذرات الجامد تصطف بانتظام.

تقع الجوامد متعددة البلورة بين الجوامد اللابلورية والبلورية، ففي الجوامد متعددة البلورة تنتظم مواضع الذرات داخل مناطق صغيرة تسمى بالحبيبات، لكن لا يوجد تشابه بين اتجاهات اصطفااف الذرات فى حبيبة ما والحبيبات المجاورة.

عند إمعان النظر فى المواد المكونة لنقاط الحالة الجامدة الموجودة حاليا سنجد أمثلة على كل نوع من أنواع البنية البلورية، فمثلا فى شاشات البلورات السائلة (LCD) سنجد أن ترانزستورات فصل -توصيل الجهد الكهربى لعناصر الشاشة تصنع من السيليكون اللابلورى، وأن السيليكون المتعدد البلورة يستخدم فى بوابات ترانزستور تأثير المجال فلز - أوكسيد -شبه موصل (MOSFET)، لكن فى الغالبية العظمى للنقاط نجد أن المناطق النشطة بالنيطة موجودة داخل سيليكون بلورى؛ لذا يصنع السواد الأعظم من النقاط فى وقتنا الحالى من أشباه الموصلات البلورية.

(٢-١) بنية البلورة Crystal Structure

عرفنا فى الفقرة السابقة مدى أهمية أشباه الموصلات البلورية بالنسبة للنقاط شبه الموصلة؛ لذا من الطبيعى أن نبحث عن معلومات إضافية عن الحالة البلورية. وهدفنا الرئيسى هنا سيكون إعطاء صورة أكثر تفصيلا عن ترتيب الذرات بداخل أشباه الموصلات الرئيسية، ولتحقيق هذا الهدف يجب أن نتعرف أولا على كيفية وصف مواضع الذرات داخل البلورة، بعد ذلك سنتدرب على ممارسة نوع من «التصوير» للشبيكة lattice ثلاثية الأبعاد -أى ترتيبها الذرى- وذلك قبل التعرض لشبيكة شبه الموصل نفسها، ثم نختتم هذا الجزء بالتعرف على أدلة ميللر Miller indices وهى فى الحقيقة عبارة عن رموز مختصرة تستخدم لتحديد المستويات والاتجاهات داخل البلورة.

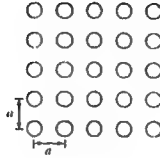
١-٢-١ مفهوم الخلية الوحدة The Unit Cell Concept

يمكن التعبير عن الخلية الوحدة ببساطة بأنها ذلك الجزء الصغير من أى بلورة، الذى يمكن استخدامه لإعادة بناء هذه البلورة. ولتوضيح مفهوم الخلية الوحدة (أو لبناء البناء) دعونا نلقى نظرة على الشبيكة ثنائية الأبعاد المبينة بالشكل (١-٢ أ) لكى نضيف هذه الشبيكة أو لكى نحدد خصائصها الفيزيائية نلجأ إلى خلية وحدة كذلك الموضحة بالشكل (١-٢ ب)، وكما هو موضح بالشكل (١-٢ ج) يمكن بناء الشبيكة الأصلية بتكرار خلية الوحدة ورصها جنباً إلى جنب مع مثيلاتها بطريقة منظمة.

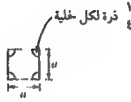
وعادة ما ينشأ نوع من الالتباس وعدم الفهم فيما يختص بخلايا الوحدة وذلك لسببين؛ الأول: هو أن خلية الوحدة قد تأخذ أكثر من شكل، فمثلا خلية الوحدة



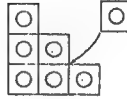
(ب)



(ا)



(د)



(ج)

شكل (٢-١) مقدمة لطريقة الخلية الوحدة لوصف الترتيبات الذرية داخل البلورات
(ا) هيئة لشبكة ثنائية الأبعاد. (ب) خلية الوحدة المتناظرة للشبكة في الجزء (ا).
(ج) إعادة إنتاج الشبكة الأبعادية. (د) خلية وحدة بسيطة.

بالشكل (٢-١ د) تعتبر مقبولة تماما مثلها مثل الموجودة بالشكل (٢-١ ب)، والسبب الثاني: هو أن خلية الوحدة ليست بالضرورة هي الخلية الابتدائية primitive (الخلية الابتدائية هي أصغر خلية وحدة ممكنة). ففي كثير من الأحيان نجد أن خلية وحدة جوانبها متعامدة تكون مناسبة أكثر من ناحية التصور عن خلية ابتدائية جوانبها مائلة، وبالمثل في الشبكات ثلاثية الأبعاد يصبح من الصعب تخيل بنائها من وحدات خلايا غير مكعبة.

٢-٢-١ خلايا وحدة بسيطة ثلاثية الأبعاد Simple 3-D Unit Cells

البلورات شبه الموصلة هي ثلاثية الأبعاد؛ ولذلك تكون خلايا الوحدة لها أيضا ثلاثية الأبعاد. يوضح الشكل (١-٣ ا) أبسط خلية وحدة ثلاثية على الإطلاق وتسمى بخلية الوحدة المكعبية البسيطة simple cubic، وهي عبارة عن مكعب يوجد في كل ركن من أركانه ذرة واحدة. يمكن إنشاء الخلية الوحدة للشبكة المكعبية البسيطة بنفس الأسلوب الذي شاهدناه في الشبكة المربعة ثنائية الأبعاد، مع ملاحظة أن ثُمن (وليس

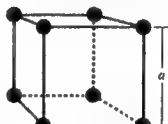
ربع) ذرة سيكون بداخل كل ركن من أركان المكعب كما هو مبين بالشكل (١-٣ب)، بتكرار رص الخلية الوحدة مع مثيلاتها نحصل على الشبكة المكعبة.

بعد إكمال تراص خلايا الوحدة سنجد أننا بإزاء مستويات متوازية كل منها يشبه الشكل (١-٢). وتكون المسافة الفاصلة بين مستويين متجاورين هي نفس طول ضلع خلية الوحدة، وتسمى بثابت الشبكة lattice constant ونرمز له بالحرف a .

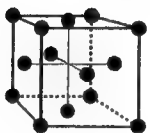
يبين الشكلان (١-٣ج)، و(١-٣د) خلايا ثلاثية الأبعاد شائعة جدا، مقارنة للخلية المكعب البسيط. الخلية في الشكل (١-٣ج) هي مكعب بسيط بعد إضافة ذرة واحدة بمركز المكعب وتسمى بخلية المكعب المتمركز الجسم body centered cubic (bcc) أما الخلية في الشكل (١-٣د) فهي مكعب بسيط بعد إضافة ذرة واحد بكل مركز وجه من أوجهه الستة وتسمى بخلية المكعب المتمركز الوجه face centered cubic (fcc).



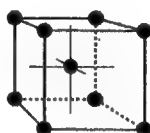
(ب)



(ا)



(د)



(ج)

شكل (١-٣) خلايا وحدة بسيطة ثلاثية الأبعاد

(ا) خلية وحدة مكعبة بسيطة sc.

(ب) خلية وحدة مكعبة بسيطة ومجموعة حرارية لكل ركن به $\frac{1}{8}$ ذرة فقط

(ج) خلية وحدة مكعبة متمركزة جسميا bcc.

(د) خلية وحدة مكعبة متمركزة وجهيا fcc.

لاحظ أن نصيب المكعب المتمركز الوجه من ذرة مركز الوجه هو النصف فقط، لأن النصف الآخر يكون من نصيب المكعب المجاور. لنحاول الآن حساب عدد الذرات بكل خلية على حدة، ففي المكعب البسيط توجد ذرة واحدة تجيء من ثمانية أركان المكعب، في كل ركن يوجد ثُمن ذرة فقط. في المكعب المتمركز الجسم توجد ذرتان: واحدة من الأركان والآخرى من المركز. أما المكعب المتمركز الوجه فيحوى أربعة ذرات فقط: واحدة من الأركان وثلاثة من الأوجه الستة للمكعب بحيث يحوى كل وجه نصف ذرة فقط، وعلى القارئ أن يمين النظر بالشكل (١-٣) ليتحقق من صحة حساباتنا. وهنا لا بد أن نذكر أن شبكة الإنترنت تحوى العديد من برامج للحاكاة المتحركة للبلورات المختلفة والتي تمكن المشاهد من مشاهدة خلايا الوحدة وهي تدور حول نفسها. للوصول لهذه البرامج، لقن هذه الكلمات لمحرك البحث «crystal structure animation».

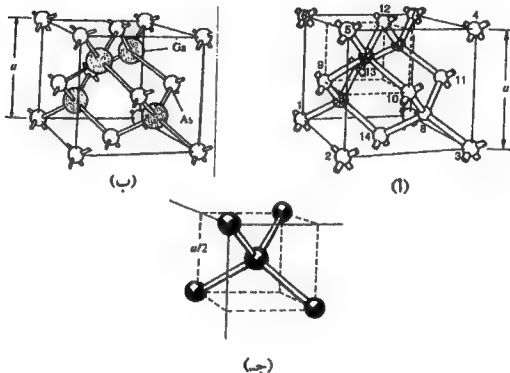
٢-٢-١ شبكات أشباه الموصلات Semiconductors Lattices

وصلنا الآن لمرحلة يمكننا من النظر لتفاصيل مواضع الذرات في أشباه الموصلات الأساسية. البنية البلورية للسيليكون (والجرمانيوم) توصف بواسطة خلية الوحدة كالموضحة بالشكل (١-٤). تسمى هذه الخلية بخلية الماس؛ لأنها تصف بلورة الماس diamond الذي هو أحد أشكال عنصر الكربون.

يقع الكربون مع السيليكون والجرمانيوم في العمود الرابع للجدول الدوري. عند فحص خلية الوحدة الماسية نجد أنها مكعبة. وفيها ذرة بكل ركن وبكل مركز وجه كما في المكعب متمركز الوجه. لكن بداخل الخلية توجد أربع ذرات أخرى كما بالشكل (١-٤). توجد إحدى هذه الذرات الأربعة على قطر جسم المكعب وعلى مسافة ربع قطر من ذرة الركن العلوى الأمامى الأيسر. مواضع باقى الذرات الأربعة مزاحة فى نفس الاتجاه ونفس المسافة - أى ربع قطر جسم المكعب - من مراكز الأوجه: العلوى، الأمامى، والأيسر. (ملحوظة - طول قطر المكعب هو $\sqrt{3}a$ وطول قطر الوجه هو $\sqrt{2}a$ ، حيث a هو طول ضلع المكعب) الشبيكة الماسية هى عبارة عن شبكتين مكعبيتين متمركزي الوجه إحداهما مزاحة بمسافة ربع قطر عن الأخرى فى اتجاه قطر جسم المكعب. قد لا يبدو ذلك واضحاً فى الشكل (١-٤) ولكن الذرات عند أركان وأوجه المكعب تنتمى للشبيكة fcc الأولى بينما ذرات الداخل تنتمى للشبيكة fcc المزاحة ربع قطر عن الشبيكة الأولى.

تسبلور معظم أشباه الموصلات III-V ومن بينها GaAs فى بنية الزنكبلند zincblende وتعتبر شببيكة الزنكبلند وخير مثال لها هى خلية وحدة شبه الموصل

GaAs الميمنة بالشكل (١-٤) - عاتلة للشبيكة الماسية. الفرق الوحيد بينهما أن الذرات كلها من نوع واحد (الكربون) في الشبيكة الماسية أما في شبيكة الزنكلند فإن ذرات الخلية fcc الأولى من عنصر بالعمود الثالث وذرات الخلية المزاخه بربع قطر تنتمي للعمود الخامس، في حالة GaAs تحتل ذرات Ga شبيكة fcc الأولى وتسكن ذرات As في الشبيكة fcc المزاخه.



شكل (١-٤)

(١) خلية وحدة ماسية.

(ب) خلية وحدة زنكلند (استعمل GaAs كمثال).

(ج) الركن العلوى للخلية في الجزء (١) مكبر للتأكيد على الأربع اقرب روابط طول ضلع المكعب

a يساوى 5.43 \AA في السيليكون و 5.65 \AA في GaAs عند $T=300K$.

بعد أن عرفنا مواضع الذرات في أشباه الموصلات الرئيسية قد نتساءل عن الاستخدام العملى لهذه المعرفة. نعم توجد بعض التطبيقات وربما أكثرها مباشرة هي الحسابات الهندسية المتعلقة بخلية الوحدة. فمثلا عند درجة حرارة الغرفة فإن ثابت الشبيكة a للسيليكون هو 5.43 \AA (الإلمحشروم \AA يساوى 10^{-8} cm)، وحيث إنه يوجد

بكل خلية وحدة 8 ذرات سيليكون (4 لكل خلية وحدة fcc)، وبالتالي يوجد فى كل سم مكعب ($8/a^3$) ذرة سيليكون أى حوالى 5×10^{22} ذرة لكل سم مكعب. ويمكن إجراء حسابات مشابهة لأنصاف الأقطار الذرية، وللمسافات بين المستويات فى الشبكة، وهكذا. لكن علينا أن نذكر هنا أن السبب الرئيسى لتحليل شبكة شبه الموصل على هذا النحو من التفصيل هو أن نمهد لحقيقة هامة يوضحها شكل (٤-١ ج) وهى «أنه يوجد لكل ذرة شبه موصل شبكته ماسية أو زنكبلند، أربعة من الجيران الأكثر قربا»، وبالتالي فإن الرابطة الكيميائية (أى غراء البلورة) هى بالاساس ذرة ترتبط بأربعة ذرات من أقرب الجيران، وسندخر هذه الحقيقة الهامة لاستعمالها لاحقا بالفصل القادم.

مثال ١-١

إذا كان ثابت الشبكة فى السيليكون هو $a = 5.43 \times 10^{-8} \text{ cm}$ ، ما هى المسافة d بين ذرة سيليكون وأقرب ذرة لها؟

الحل :

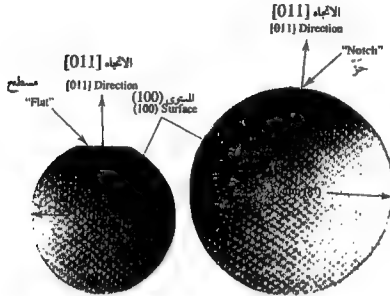
كما هو مبين بالشكل (٤-١) المسافة بين الذرة فى الركن العلوى الامامى وأقرب جيرانها هو ربع قطر جسم، وبما أن قطر الجسم للمكعب من فيثاغورث هو $a\sqrt{3}$ إذن:

$$d = \frac{\sqrt{3}}{4} a = \frac{\sqrt{3}}{4} (5.43 \times 10^{-8}) = 2.35 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

٤-٢-١ أدلة ميللر Miller Indices

نأخذ بلّورات السيليكون المستخدمة فى تصنيع النابض شكل قرص دائرى دقيق السمك كالمبينة بالشكل (٤-١) هذه الأقراص المصورة هنا والتي تعرف برقائى السيليكون Si wafers هى المادة الخام التى يبدأ بها المصنعون الرئيسيون تصنيع النابض، ويهمننا هنا أن نذكر أن سطح الرقاقة يتم تجهيزه مسبقا بعناية ليكون موازيا لمستوى بلورى معين. كما أنه توضع على الرقاقة علامة عن طريق قطع جزء مستوى أو آخر مشقوق من الرقاقة للدلالة على توجيه الرقاقة، ويهتدى المصنعون بتلك العلامات - سواء المستوية فيها أو المحزوزة - عند نشر الرقاقة لقطع صغيرة تحوى كل منها نبيلة مفردة، يقل الفاقد فى النابض إذا ما تم القلع باتجاهات معينة بالنسبة للبلورة (قطع البلورة فى اتجاهات محددة ضرورى أيضا عند صقل بلورات الماس لتقليل الفاقد). وما نود أن نؤكد عليه

هنا هو الأهمية العملية لمعرفة الاتجاهات والمستويات البلورية، وكذلك نستخدم أدلة ميللر الموضحة بالصورة (٥-١) لتحديد المستويات والاتجاهات داخل البلورة.



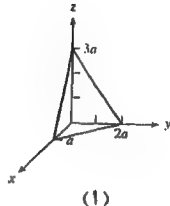
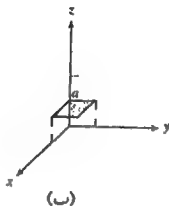
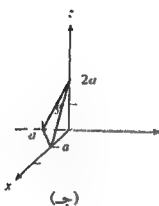
شكل (٥-١) رقاقات سايكون البلورة الواحدة، المستخدمة لغطيا كقواعد ابتدائية بواسطة مصنعى النماذج الرئيسيين. الرقاقات $150mm$ ، $200mm$ سمكهما $0.625mm$ و 0.7588 على الترتيب، الوجه الأمامى يلمع ويبرد ويحفر لإعطاء سطح خال من العيوب ويشبه المرآة. يظهر الشكل مستويات واتجاهات محددة بأدلة ميللر

تُحدد أدلة ميللر لاي مستوى يحوى على ذرات من البلورة بإجراء أربع خطوات نوضحها بالتفصيل كما يلي، مع استخدام القيم المثلة فى الشكل (١-٦) كمثال.

١- بعد توجيه محاور الإحداثيات باتجاه أحزف خلية الوحدة، نحصد الأجزاء المقطوعة من المحاور مع المستوى. ثم نقسم أطوال هذه الأجزاء على طول ضلع خلية الوحدة على الصورة :

$$\frac{1a}{a}, \quad \frac{2a}{a}, \quad \frac{3a}{a}$$

بذلك نحصل على ثلاثة أرقام x, y, z بالقيم 1, 2, 3.



شكل (٦-١) عينات من مستويات البلورة المكعبة

(١) المستوى (632) أستخدم لتوضيح طريقة أدلة ميللر.

(ب) المستوى (001).

(ج) المستوى (2 2 1).

٢- نكتب مقلوبات أرقام الأجزاء المقطوعة لتصبح $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}$.

٣- نضرب المقلوبات السابقة في عدد صحيح موجب مناسب بحيث تكون المقلوبات متناسبة مع أصغر أعداد صحيحة ممكنة فنحصل على 6, 3, 2.

٤- نكتب هذه الأعداد داخل أقواس دائرية فتصبح (632).

يجب أن تؤخذ في الاعتبار النقاط التالية :

أ- عندما يتواري المستوى مع أحد المحاور يكون القطع عند ∞ ومقلوبه صفر. كمثال الأجزاء المقطوعة في الشكل (٦-١) ب هي $1, \infty, \infty$ ، وبالتالي تكون أدلة ميللر هي (001).

ب- إذا كان للمستوى المطلوب تحديد أدلته جزءه مقطوع على الناحية السالبة من محور ما فإننا نضع شرطة فوق الدليل المناظر مثلاً المستوى بالشكل (٦-١) ج) نعين له الأدلة (221).

جـ بالرجوع للشكل (١-٤) سنجد أن الستة مستويات التي تنطبق على أوجه المكعب تحوى نفس الترتيب من الذرات. وبسبب تماثل البلورة سنجد أنه من المستحيل التمييز بين المستويات المتكافئة (100)، (010)، (001)، (100)، (010)، (001).

نعيد صياغة هذه الحقيقة بالعبرة التالية: مستحيل التمييز بين مجموعة المستويات {100} المتكافئة ويعبر عنها برمز ميلر ذى الأقواس المتوجة { } .

٤- لتحديد أدلة ميلر لمستوى يمر بنقطة الأصل نعين أدلة ميلر لمستوى آخر يوازي المستوى الأصلي، ومن تناظر المستويات المتوازية تكون أدلة المستوى الأصلي هي نفسها أدلة المستوى الموازي.

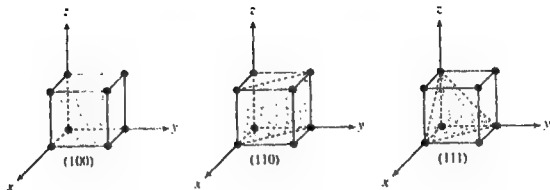
الثلاثة مستويات الأكثر شيوعا هي (100)، (110)، (111). هذه المستويات موضحة بالشكل (١-٧) والذي يأخذ الشبيكة المكعبة البسيطة كمرجع. (ملحوظة، الشبيكة المكعبة البسيطة تذكر كنموذج فقط لكنها وعلى العكس من الشبيكات المكعبة الأخرى فإنها غير موجودة بالطبيعة).

أدلة ميلر للاتجاه، تشبه إحداثيات المتجهات vectors التي يدرسها الطالب في منهج جبر المتجهات. لتحديد أدلة ميلر لاتجاه ما نأخذ متجها في نفس الاتجاه ثم نقوم بضربه في معامل حتى تصبح إحداثياته الثلاثة أقل ثلاثة أعداد صحيحة ممكنة. ثم نضع هذه الأعداد الصحيحة داخل قوس مربع []. والأقواس المثلثة $x y z <$ ترمز لكل الاتجاهات المكافئة. والمتجهات الثلاثة الأكثر شيوعا وأدلة ميلر المكافئة لها موضحة بالشكل (١-٧ ب).

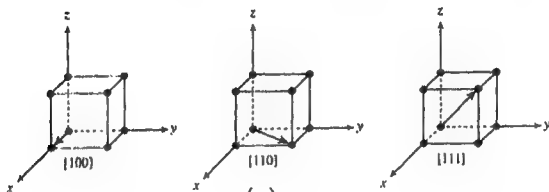
نلخص رموز أدلة ميلر المختلفة كالآتي :

الرمز	الكيان المناظر
(h k l)	مستوى بلورى
{h k l}	مستويات متكافئة
[h k l]	اتجاه بلورى
<h k l>	اتجاهات متكافئة

الذى ناقشناه حتى الآن هو إيجاد أدلة ميلر لمستوى أو اتجاه بلورى، ماذا عن العكس: إذا كان لدينا أدلة ميلر فكيف نحدد المستوى أو الاتجاه البلورى المناظر؟ من حسن الحظ أنه نادرا ما نقابل أدلة خلافا للثلاثة (001)، (110)، (111) (أو الأدلة على الاتجاه [001]، [110]، [111])، وهى موضحة بالشكل (١-٧) ويمكن حفظها بسهولة مع التكرار.



(أ)



(ب)

شكل (٧-١) تصوير (أ) مستويات و (ب) الاتجاهات شائعة مع أدلة ميلر لها

من المفيد أن نلاحظ أن في البلورات المكعبة تكون المستويات (hkl) عمودية على الاتجاهات $[hkl]$ ، وبالنسبة لأية أدلة أخرى - خلافاً للثلاثة الشائعة المذكورة أعلاه - علينا أن نعكس الخطوات السابق ذكرها للحصول على المستويات أو الاتجاهات.

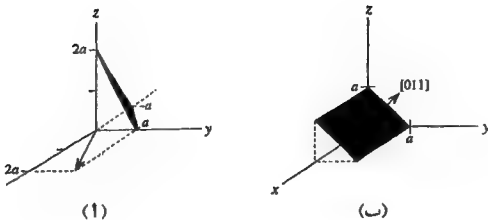
مثال ١-٢ :

(أ) حدد أدلة ميلر للمستوى والاتجاه الموضحين بالشكل (٨-١).

(ب) ارسم المستوى الذي أدلته (011) وكذلك الاتجاه $[011]$.

الحل :

(أ) الأجزاء المقطوعة هي $x=1, y=1, z=2$. المقطوعات على التوالي هي : $1, 1, \frac{1}{2}$. بالضرب في 2 للحصول على أقل مجموعة أعداد صحيحة نحصل على أدلة ميلر $(2\ 2\ 1)$ للمستوى



شكل (١-١) - مثال ٢-١

بالنسبة للاتجاه في الشكل (١-١) نجد أن مساقطه على المحاور x, y, z هي: $2a, a, 0$ على الترتيب بالقسمة على a نحصل على أدلة ميل $[2\ 1\ 0]$ لهذا الاتجاه.

(ب) للمستوى (011) مقلوبات الأجزاء المقطوعة هي $0, 1, 1$ على الترتيب، وبالتالي $x=\infty, y=1, z=1$ أى أن المستوى يوازي المحور x ويقطع المحور y عند $y=1$ والمحور z عند $z=1$ كما هو موضح بالشكل (١-١) (ب).

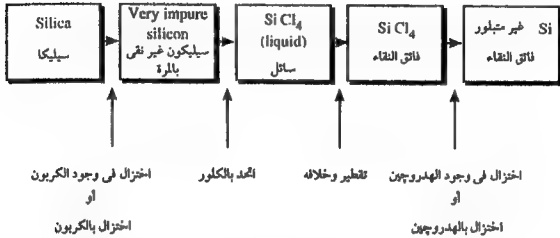
في الشبكة المكعبة يكون الاتجاه $[011]$ عموديا على المستوى (011) وبالتالي نرسم هذا الاتجاه كما بالشكل (١-١) (ب).

(٢-١) نمو البلورة Crystal Growth

١-٢-١ الحصول على السيليكون الفائق النقاء Obtaining Ultra Pure Si

عندما ننظر لأشباه الموصلات المتاحة وخصوصا السيليكون الواسع الانتشار، فإننا نتساءل عن مصدر بلورة السيليكون المفردة المستخدمة في نوايا الزمن المعاصر. هل مصدر هذا السيليكون هو ترسيبات الأحجار الرملية؟ الإجابة لا. هل يستخرج مثل الماس والذهب من مناجم معينة؟ الإجابة مرة أخرى بالنفي. فعنصر السيليكون يمثل ثاني أكثر العناصر شيوعا بالقشرة الأرضية ويدخل في تركيب العديد من المركبات مثل السيليكا (أكسيد السيليكون SiO_2) والسيليكات (مركبات تحوي السيليكون والأكسجين

رائد عناصر إضافية). بالرغم من ذلك كله فإن السيليكون لا يتواجد فى الطبيعة كعنصر مستقل. بلورة السيليكون المفردة المستخدمة فى صنع النباط هى فى الحقيقة مادة يصنعها الإنسان.



شكل (٩-١) موجز العمليات المستخدمة لإنتاج السيليكون الفائق النقاء
العمليات هى بالترتيب: الاختزال بالكربون - الكلورة والتقطير - الاختزال بالهيدروجين

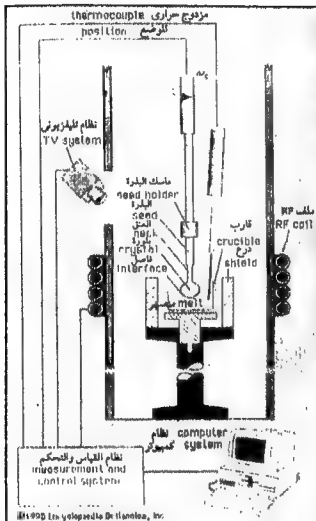
يتضح من المدخل السابق أن الخطوة الأولى نحو الحصول على سيليكون البلورة الواحدة هى فصل السيليكون من مركباته ثم تنقيته. يوضح الشكل (٩-١) عمليات الفصل والتنقية الباردة. أولاً، يتم إنتاج السيليكون ذى النقاء المنخفض أى الفيروسيليكون عن طريق تسخين السيليكا مع الكربون فى فرن كهبرى. يقوم الكربون أساساً بانتزاع الأكسجين من السيليكا (أى يختزله بلمغة الكيمياء) تاركاً خلفه السيليكون غير النقى. بعدها تتم كلورة chlorination الفيروسيليكون لتحويله لمادة سائلة عند درجة حرارة الغرفة (SiCl_4 أو SiHCl_3). قد يبدو هذا غريباً لكن خطوة التسييل هذه هى مناوره بارعة. فبينما يكون من الصعب جداً تنقية المواد الصلبة فإن هناك طرقاً لمطية لتنقية السوائل. بعد عديد من عمليات التقطير وعمليات أخرى نحصل على SiCl_4 (أو SiHCl_3) فائق النقاء. أخيراً باختزال الهاليد العالى النقاء فى جو من الهيدروجين نحصل على السيليكون فائق النقاء المطلوب $[\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{HCl} + \text{Si}]$.

٢-٣-١ تكوين البلورة المفردة Single-Crystal Formation

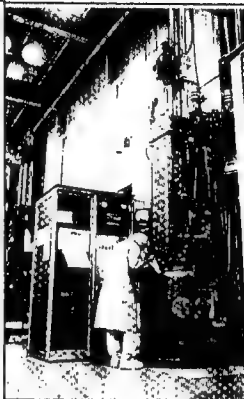
السيليكون الناتج من العملية التي وصفناها فائق النقاء لكنه ليس في صورة بلورة مفردة بل في صورة سيليكون متعدد البلورة، بالتالي تلزم عملية أخرى لتحويله لبلورة مفردة كبيرة جاهزة لتصنيع النواقل. الطريقة الأكثر شيوعا للحصول على بلورة مفردة كبيرة هي طريقة تشوكراالسكى. في هذه الطريقة يسخن السيليكون في قارب من الكوارتز في جو من غاز خامل لتحضير مصهور السيليكون كما هو موضح بالشكل (١-١٠). تثبت بلورة صغيرة من السيليكون بأسفل عمود يسمى عمود البذرة. يتم اختيار الاتجاه العمودي على السطح السفلي للبلورة البذرة بعناية ليكون باتجاه معروف مسبقا (عادة ما يكون <111> أو <100>). تغطس البلورة البذرة في مصهور السيليكون، وبعد تحقيق الاتزان الحرارى تنخفض درجة حرارة المصهور الملامس للبلورة ويبدأ في التجمد بأسفل البذرة مكونا امتدادا بلوريا في نفس اتجاه بلورة البذرة. ثم يبدأ في تدوير عمود البذرة ببطء مع سحبه لأعلى لإنهاء بلورة أكبر فأكبر. يعرض الشكل (١-١٠ ج) صورة فوتوغرافية للبلورة الكبيرة بعد تكوينها. تعرف البلورة الكبيرة الاسطوانية الشكل باسم الصبة ingot، وتأتى بقطر 200 mm، أو 300 mm وطول من متر إلى مترين. تنتج رقائق السيليكون (التي سمكها حوالى واحد ملليمتر) المستخدمة في إنتاج النواقل عن طريق قطع الصبة إلى مقاطع باستخدام منشار له حد من الماس.

(١-٤) ملخص :

يوفر هذا الفصل المعلومات الأساسية عن أشباه الموصلات عموما والسيليكون على وجه الخصوص. ذرات أشباه الموصلات المكونة من عنصر واحد لها أربعة إلكترونات تكافؤ. السيليكون المستخدم لإنتاج النواقل يأتى في صورة بلورة مفردة من سيليكون فائق النقاء. يتبلور هذا السيليكون على هيئة شبيكة ماسية بينما يتبلور ررنخيد الجاليوم Ga As في صورة شبيكة زنكلند، وفي كلتا الحالتين تحاط كل ذرة في الشبيكة بأربعة أقرب جيران. أدلة ميللر التي نوقشت في سياق التركيب البلورى هي الوسيلة المتفق عليها لتحديد المستويات والاتجاهات داخل البلورة. وأخيرا فإن بلورات السيليكون المفردة الكبيرة تنتج بواسطة طريقة تشوكراالسكى.



(ب)



(١)



(ج)

شكل (١٠١) جهاز سحب السيليكون والبلورة

المفردة الناتجة

(١) صورة فوتوغرافية لساحب تشوكر السكي يعمل

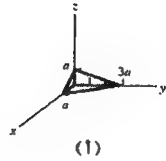
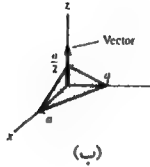
بتحكم الحاسب

(ب) مخطط مبسط للساحب

(ج) صبة ingot سيليكون بلورة واحدة.

أسئلة على الفصل الأول :

- ١ - أجب على الأسئلة التالية بإيجاز :
 - أ - اذكر اسم شبه موصل أحادى العنصر وآخر مركب III-V.
 - ب- ما الفرق بين مادة متبلورة وأخرى متعددة البلورة ؟
 - ج- عرف بالكلمات الخلية الواحدة.
 - د- ما عدد الذرات فى خلية وحدة واحدة لكل من التراكيب التالية : مكعب بسيط - bcc - fcc - شبكة ماسية.
 - هـ - \AA 1 يساوى كم cm ؟
 - و - بدلالة ثابت الشبكة a ما هى المسافة بين أقرب ذرتين فى شبكة مكعب بسيط ؟
 - ز - كم عدد الذرات الأقرب جيرة فى الشبكة الماسية والشبكة الزنكبليند ؟
 - ح - ما الفرق بين القوسين () ، [] عند استخدامهما كأدلة ميللر ؟
 - ط - صف طريقة تشوكرالسكى لإنتاج بلورة مفردة.
- ٢ - بين الشكل (١-٤) خلية وحدة Ga As. صف أو ارسم خلية وحدة لبلورة $\text{Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$.
- ٣ - ثابت الشبكة للجermanيوم عند درجة حرارة الغرفة هو $a = 5.65 \times 10^{-8} \text{cm}$. احسب عدد ذرات الجermanيوم لكل cm^3 .
- ٤ - بدلالة ثابت الشبكة a ما هى أقل مسافة بين الذرتين الأكثر قربا فى حالة :
 - (أ) الشبكة bcc (ب) الشبكة fcc.
- ٥ - سطح رقاقة سيليكون هو المستوى (100).
 - (أ) ارسم مخططا لمواضع الذرات على سطح الرقاقة.
 - (ب) حدد عدد الذرات لكل cm^2 على سطح الرقاقة.
 - (ج) أعد الجزئين (أ) و (ب) إذا كان سطح الرقاقة هو المستوى (110).



شكل (م ١-٦)

٦- اكتب الخطوات الوسيطة عند إجابة الأسئلة التالية :

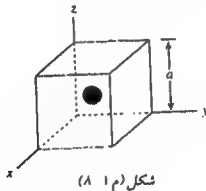
أ- كما هو مبين في الشكل (م ١-٦ أ) فإن مستوى البلورة يقطع المحاور عند x, y, z عند $1a, 3a, 1a$ بالترتيب، حيث a هو طول ضلع الخلية المكعبة. ما هي أدلة ميللر لهذا المستوى؟ ما هي أدلة ميللر للاتجاه العمودي على هذا المستوى.

ب- بافتراض أن التركيب البلوري مكعب احسب أدلة ميللر للمستوى وكذلك للمتجه المبين بالشكل (م ١-٦ ب).

٧- بافتراض أن البلورة مكعب بسيط ارسم مخطط للمستويات الآتية :

(1 2 3) (ج)	(1 1 1) (ب)	(001) (1)
(1 $\bar{1}$ 1) (د)	(0 1 0) (هـ)	(1 1 0) (د)
	(0 $\bar{1}$ 0) (ج)	(2 2 1) (ر)

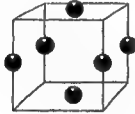
٨- شبكة بلورية لها خلية وحدة مكعبة كما بالشكل (م ١-٨). نحوى الخلية ذرة واحدة فقط عند مركز المكعب.



شكل (م ١-٨)

- (١) ما اسم الشبيكة المولدة من خلية الوحدة المعطاة ؟
 (ب) حدد عدد ذرات الشبيكة لكل cm^3 بدلالة الثابت a .
 (ج) نفترض أن مستوى سطح البلورة هو (110) عين عدد الذرات لكل وحدة مساحات والتي تقع مراكزها في المستوى (110).
 (د) برسم متجه من نقطة الاصل لمركز الذرة الموجودة في خلية الوحدة . عين أدلة ميللر لهذا المتجه .
- ٩- إذا عاملنا الذرات ككرات صلبة نصف قطرها يساوى نصف المسافة بين أقرب ذرتين . بين أن نسبة الحجم الذى تحتله الذرات إلى الحجم الكلى المتاح للتركيبات البلورية المختلفة هى:

- (١) $\pi/6$ أى 52% لشبيكة المكعب البسيط .
 (ب) $\sqrt{3} \pi/8$ أى 68% لشبيكة hcc .
 (ج) $\sqrt{2} \pi/6$ أى 74% لشبيكة fcc .
 (د) $\sqrt{3} \pi/6$ أى 91% للشبيكة الماسية .
- ١٠- شبيكة مكعبة بها ذرة عند منتصف كل ضلع رأس الشكل (م ١-١٠) وذرة عند مركز القاعدة العليا وأخرى عند مركز القاعدة السفلى .

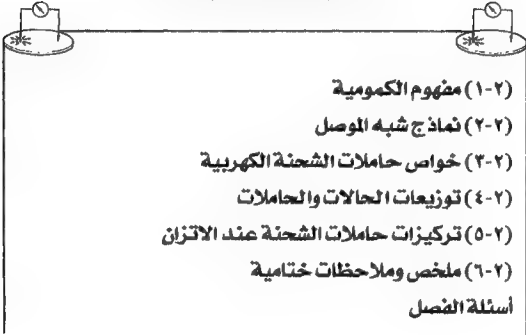


شكل (م ١-١٠)

- (١) كم ذرة لكل خلية : 4 ، 2 ، 1 ، أم $\frac{1}{2}$ ؟
 (ب) هل يمكن تصنيف هذه الشبيكة ضمن الشبيكات (fcc - hcc - sc - ماسية) .



الفصل الثاني
نمذجة حاملات الشحنة
CHARGE CARRIERS MODELING



أصبح معروفا أن حاملات الشحنة تنتقل من مكان لآخر داخل المادة لتسبب تيارات كهربية. وفي الموصلات التي تقوم بنقل التيار عبر الأسلاك يوجد نوع واحد من الجسيمات وهو الإلكترون. بجانب الإلكترون يوجد في شبه الموصلات حاملات شحنة أخرى هي الشفرة. تمثل الإلكترونات والشفرات بما تحمله من شحنات كهربية مركز اهتمام هذا الفصل، حيث نقوم بفحص المفاهيم المرتبطة لهذه الحاملات وكذلك نماذجها، وخصائصها، وأيضا المصطلحات الخاصة بها.

ستجرى تذكرة القارئ مرارا، وها نحن نؤكد على ذلك من البداية على أننا دائما سنفترض أن الظروف السائدة في شبه الموصل -في هذا الفصل- هي ظروف الاتزان.

وال«الاتزان» هنا يعنى عدم وجود أية قلاقل *perturbation*. فتحت ظروف الاتزان لن توجد جهود كهربية خارجية، ولا مجالات مغناطيسية، ولا إجهادات ميكانيكية، ولا أية قوى مقلقة من أى نوع تؤثر على شبه الموصل. وكل الكميات الممكن قياسها ستظل ثابتة مع الزمن، وسيوفر ذلك إطارا مرجعيا ممتازا. عندما نقوم بتحديد الخصائص المميزة لشبه الموصل في ظروف الاتزان، فإننا سنستطيع لاحقا أن نستقرئ ونمد *extrapolate* هذه الخصائص لتشمل أيضا حالات عدم الاتزان عند وجود قلقة خارجية.

ونشير مسبقا بأن بعض العلاقات الرياضية والحقائق ستعطى بدون برهان كاف. لإعطاء الأهمية لتفسير النتائج واستخدامها وليس لاشتقاقها. ويمكن لمن يود الرجوع للمراجع الأكثر تفصيلا.

(١-٢) مفهوم الكمومية The Quantization Concept

بدلا من محاولة التعامل مباشرة مع الإلكترونات فى السيليكون، حيث يوجد 14 إلكترونات لكل ذرة وحوالى 5×10^{22} ذرة لكل سنتيمتر مكعب، سنسلك طريقا واقعيّا ونحاول إرساء قواعد أساسية معينة باختيار النظم الذرية البسيطة، وأبسطها على الإطلاق ذرة الهيدروجين المنعزلة، التى خضعت لتمحيص شديد بمطلع القرن العشرين. فى ذلك الوقت عرف العلماء أن ذرة الهيدروجين تحوى إلكترونات واحدا سالب الشحنة يدور فى فلك جسم موجب أثقل منه. والذي لم يكونوا على دراية به هو السبب فى أن الذرة

المستثارة تطلق ضوءاً له أطوال موجية محددة وأن طيف الضوء المنبعث من الذرة ليس طيفاً متصلاً بل هو عبارة عن خطوط كل خط له طول موجة محدد. وقد حيرت هذه الظاهرة الكثيرين لاعتقادهم بضرورة أن يكون الطيف مصلاً كالطيف المنبعث من جسم ساخن.

اقترح «بوهر» في عام 1913 حلاً لهذه المعضلة فافترض أن العزم الزاوى (حاصل ضرب كمية الحركة في نصف قطر المدار) لا بد وأن يأخذ قيماً محددة (مضاعفات صحيحة للثابت \hbar) وسياخذ نصف قطر المدار بالتالى قيماً منفصلة محددة. عرف هذا الفرض بكمومية العزم الزاوى، وهذا أدى إلى كمومية الطاقة، أى أن :

$$E_n = - \frac{m_e e^4}{2 (4\pi \epsilon_0 \hbar n)^2} = - \frac{13.6 \text{ eV}}{n^2} \quad (2-1)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

تمثل طاقة ربط الإلكترون للذرة الهيدروجين، فإذا كان الإلكترون فى المدار n وأعطيت له الطاقة E_n سيترك نواة الذرة ويتحرر. والثابت :

$$m_e \text{ هى كتلة الإلكترون الحر } (m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})$$

$$q \text{ شحنة الإلكترون } q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \text{ (كولومب) } (C = \text{كولومب})$$

$$\epsilon_0 \text{ سماحية الفراغ } \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \text{ ، ويساوى } \hbar = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J.S}$$

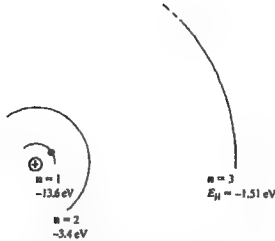
حيث h ثابت بلانك.

n يسمى بالعدد الكمى الرئيسى.

$$1 \text{ eV هو الإلكترون فولت ويساوى } 1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

كنتيجة لنظرية بوهر عند انتقال الإلكترون من مدار له عدد كمى n معين لمدار آخر له عدد كمى n' أصغر يصاحبه انبعاث للطاقة على هيئة كمية الضوء بطول موجة محدد، شكل (٢ ١). وكان هذا هو التفسير الذى قدمه بوهر للأطياف المتقطعة.

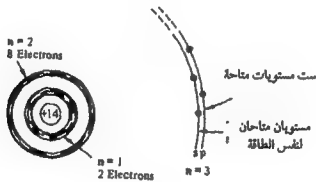
الذى يهمنى من نموذج بوهر هو أن طاقة الإلكترون فى النظم الذرية تأخذ قيماً متقطعة discrete. وكما ستفهم فإن مخطط مستويات الطاقة للذرة السيليكون سيكون



شكل (٢-١) ذرة الهيدروجين تمثيل مثالي يظهر الثلاثة مدارات الأولى
السموح لها والطاقة المكممة المنطوية

أكثر تعقيدا من نظيره بلورة الهيدروجين، طبقا لقوانين ميكانيكا الكم فإن إلكترونات ذرة السيليكون تشغل ثلاثة مدارات رئيسية، انظر الشكل (٢-٢)، عشرة إلكترونات تشغل المدارين العميقين الداخليين ($n = 1, n = 2$) وترتبط بالنواة ارتباطا وثيقا. هذا الارتباط الوثيق يمنع الإلكترونات العشرة من الاشتراك في التفاعلات الكيميائية للذرة ومن الاشتراك في حمل التيار الكهربى. هذه الإلكترونات العشرة عادة ما تسمى بالإلكترونات اللب core في الذرة.

الإلكترونات الأربعة المتبقية ترتبط بالذرة ارتباطا ضعيفا، ويطلق عليها تسمية إلكترونات التكافؤ valence electrons لمشاركتها بنشاط في التفاعلات بين الذرات.



شكل (٢-٢) تمثيل تخطيطى للذرة سيليكون معزولة

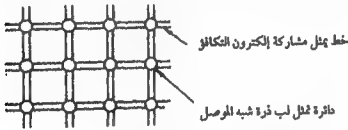
وكما هو مبين بالشكل (٢-٢) فإن إلكترونات التكافؤ الأربعة إذا ما تركت بدون حدوث قلاقل من الخارج ستشغل أربعة من عشرة فتحات (أو حالات) طاقة تقع مباشرة فوق مستويات طاقة إلكترونات اللب. ونلاحظ هنا أن ذرة الجرمانيوم (وهو العنصر شبه الموصل الآخر) والتي بها 32 إلكترونًا تشبه جدًا ذرة السيليكون عدا أن لب الجرمانيوم يحوى 28 إلكترونًا.

(٢-٢) نماذج شبه الموصل Semiconductor Models

بناء على المعلومات التي تعرفنا عليها حتى الآن سنقدم هنا نموذجين هامين أو أداتين من الأدوات المساعدة للتصور visualization المستخدمة على نطاق شامل في تحليل نبائط أشباه الموصلات. قد يبدو غريبًا أن نقدم نماذج شبه الموصل في فصل يتناول بالأساس نمذجة الحاملات. لكن سيزول الاستغراب إذا ما عرفنا أننا هنا نمذج model الرعاء الحاوى للحاملات ونقصد به بلورة شبه الموصل ذاتها.

٢-٢-١ نموذج الروابط Bonding Model

عرفنا أن ذرة السيليكون المنعزلة أى التى لا تتفاعل مع الذرات الأخرى تحوى أربعة إلكترونات تكافؤ. من ناحية أخرى فإن ذرات السيليكون التى تضمها الشبكة الماسية تبنى ترابطًا على هيئة تجاذب بين كل ذرة وأربعة من جيرانها الأكثر قربًا (ارجع للشكل (٤-١ ج)). المفزى هنا أنه بالتحول من حالة ذرة معزولة إلى حالة التجميع البلورى تلجأ كل ذرة بإشتراك أحد إلكترونات التكافؤ مع كل واحدة من الجيران الأربعة الأكثر قربًا. هذه الرابطة التساهمية covalent - أى المشاركة المتساوية للإلكترونات التكافؤ بين الجيران الأكثر قربًا- تعطى نموذجًا مثاليًا لشبه الموصل كالمبين بالشكل (٢-٣).



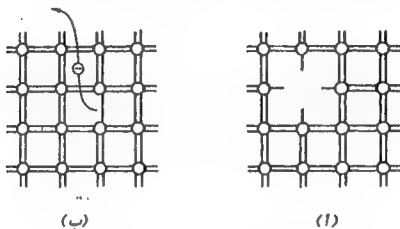
شكل (٢-٣) نموذج الروابط - الخط يمثل إلكترون تكافؤ مشترك

والدائرة تمثل قلب ذرة شبه الموصل

فى هذا الشكل تمثل كل دائرة لب ذرة شبه موصل بينما يمثل كل خط أحد إلكترونات التكافؤ المساهمة (يوجد ثمانية خطوط تربط الذرة بجيرانها؛ لأن كل ذرة تمنح أربعة إلكترونات، وكذلك تقبل مساهمة الجيران بأربعة إلكترونات أخرى).

طبعا المخطط الثنائي الأبعاد هو مجرد تبسيط للمساعدة على التخيل؛ لأن الذرة وجيرانها الأربعة لا تقع في الواقع في مستوى واحد، لكن الذرة تشغل مركز هرم رباعي الأوجه وجيرانها بأركان الهرم الأربعة - كل أوجه الهرم الرباعي الأوجه - عبارة عن مثلثات متساوية الأضلاع.

وبرغم أن نموذج الروابط سيستعمل كثيرا في الفقرات اللاحقة، فإنه من المفيد هنا إعطاء عينة من تلك الاستخدامات لتوضيح كيفية الاستفادة من هذا النموذج. يرى في الشكل (٢-٤) تطبيقين كمعينة. في الشكل (٢-٤) نستخدم نموذج الروابط لتصوير عيب نقطي point defect أى ذرة غائبة من التركيب الشبكي.



شكل (٢-٤) عينة من استخدامات نموذج الروابط

ا) تصوير ذرة مفقودة أو عيب نقطة.

ب) الكسار رابطة ذرة-ذرة ونحمر إلكترون.

يصور الشكل (٢-٤) ب) تكسر رابطة بين ذرتين متجاورتين وما يستتبعه ذلك من انطلاق إلكترون حر. عند درجات حرارة تملو الصفر المطلق تتكسر الروابط وتتكون عيوب الشبكة بشكل طبيعي وتأخذ في التزايد مع زيادة درجة الحرارة، ولهذا فإن النموذج المثالي كالموضح بالشكل (٢-٣) يمثل شبه الموصل عند درجة حرارة الصفر المطلق فقط وأيضا عندما يكون شبه الموصل خاليا من أى شوائب أو عيوب.

٢-٢-٢ نموذج نطاق الطاقة (شريط) Energy Band Model

إذا قصر اهتمامنا فقط على النواحي الفراغية للأحداث الواقعة داخل شبه الموصل فربما يمكن عندئذ الاكتفاء بنموذج الروابط. غير أننا نهتم أيضا بالنواحي المتعلقة

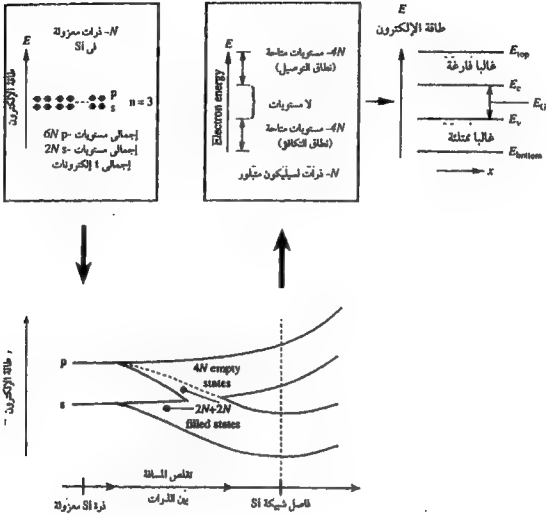
بالطاقة في منظومة شبه الموصل. في هذه الحالة سيغدو نموذج الروابط -الذى لا يخبرنا بأى شيء عن الطاقة- عديم الجدوى وسيصبح نموذج نطاق (شريط) الطاقة هو أداة التصور الأساسية.

دعونا نبدأ مسلسل المفاهيم المؤدى لنموذج نطاق الطاقة باستدعاء الوضع داخل ذرة سيليكون معزولة، بالرجوع للمناقشة في الفقرة ٢-١ نذكر أن عشرة من الإلكترونات الأربعة عشر في ذرة السيليكون المعزولة تكون مرتبطة ارتباطا وثيقا بالنواة، ومن المستبعد أن تتقلقل من مكانها في لب الذرة بسبب تفاعلات الذرة مع جيرانها. الإلكترونات الأربعة المتبقية هي التي ترتبط ارتباطا ضعيفا، إذا لم تتعرض لقلقل فإنها ستشغل مستويات الطاقة التي تعلو آخر مستوى طاقة للإلكترونات اللب. ويفهم ضمنا أن عدد N من ذرات السيليكون ستكون كلها متماثلة ومستويات الطاقة لها متطابقة طالما أن كل هذه الذرات متباعدة بما فيه الكفاية ولا يتفاعل بعضها مع بعض.

هل يمكن الاستفادة من معلوماتنا عن الذرات المعزولة لاستقراء بعض المفاهيم عن الذرات في الحالة البلورية؟ أولا: دعونا نتجاهل من الآن فصاعدا إلكترونات اللب لأنها لا تتأثر بالقوى العادية بين الذرات. وبالعكس فإن حالات إلكترونات التكافؤ التي تخص N من الذرات ستعدل جذريا بالانتقال إلى الحالة البلورية. أى أن تقارب الذرات كما في حالة السيليكون البلورى سيؤدى لا محالة لتعديلات في حالة الطاقة للإلكترونات التكافؤ.

يبين الشكل (٢-٥) التغيرات التي تحدث لمستويات الطاقة للإلكترونات التكافؤ. إذا بدأنا بـ N من الذرات المعزولة وأخذنا نقرّبها بعضا لبعض رويدا رويدا سنجد أن القوى الذرية ستعمل على توسيع مستويات الطاقة إلى نطاقات طاقة. أى أن حزمة N من مستويات الطاقة المتطابقة -التي كانت تمثل بخط وحيد- على محور الطاقة للذرات N المعزولة ستبدأ في الانفصال على هيئة حزمة مستويات متراسة ومتلاصقة وتسمى هذه الحزمة بنطاق الطاقة. يحدث هذا لكل مستوى طاقة للذرة المعزولة. المستوى يتسع ليصبح نطاقا. عندما يصبح الفاصل بين الذرات هو ثابت الشبكة (أى حوالى عدة أنجسترومات) تتورع الحالات الثمانية المسموح بها للإلكترونات التكافؤ الخاصة بـ N من الذرات إلى نطاقى طاقة يفصل بينهما فجوة طاقة energy gap أو فجوة نطاق band gap. النطاق الأعلى يسمى بنطاق التوصيل conduction band، والأسفل هو نطاق التكافؤ valence band، وإشغال النطاقيين يحكمه عدة مبادئ:

أولا: مبدأ استبعاد «باولي» الذى ينص على أنه: «لا يمكن لإلكترونين أن يشغلا



شكل (٢-٥) مفهوم تطور نطاق الطاقة بدءاً من N ذرة سيليكون متباعدة بأعلى اليسار وانتهاء إلى نموذج نطاق طاقة مكتمل الصورة بأعلى اليمين

نفس الحالة الكمية (المكعبة). أي أن الحالة الواحدة إما أن تكون غير مشغولة أو مشغولة بإلكترون واحد.

ثانياً : تشغل الحالات ذات الطاقات الأقل أولاً، أي أن الإشغال يتم من أسفل إلى أعلى. عدد إلكترونات التكافؤ في البلورة هو $4N$ ويحوى نطاق

التكافؤ على $4N$ من الحالات، وبالمثل نطاق التوصيل يحوى أيضا $4N$ من الحالات.

من هذا كله نستنتج أن الإلكترونات التى عددها $4N$ ستشغل نطاق التكافؤ بالكامل بينما يظل نطاق التوصيل خاليا. وبالفعل هذا هو التوزيع الحادث عند درجة حرارة الصفر المطلق $T=0\text{ K}$.

ولكى نكمل وجامعة النموذج سنحتاج لاستعراض حقيقة إضافية. فبعكس حالة الذرة المعزولة فإن إلكترونات النطاق ليست مرتبطة بذرة بعينها. صحيح أنه بالمعوسط سنجد أربعة إلكترونات مشتركة بين الذرة وجيرانها كما فى نموذج الروابط. لكن هوية الإلكترونات المشتركة تتغير مع الزمن؛ لأن الإلكترونات تتحرك من نقطة لأخرى. وبصيغة أخرى فإن حالات الإلكترونات لم تعد حالات ذرية بل حالات مرتبطة بالبلورة ككل، ويصبح تشكيل الحالات المسموح بها مستقلا عن موضع النقطة التى ندرسها فى داخل البلورة التامة. ومن ثم نستنتج أن فى حالة البلورة التامة (الحالية من أى عيوب أو شوائب) تكون منحنيات مستوى الطاقة -كدالة فى المسافة المقاسة فى اتجاه محدد- مستقلة عن المسافة (أى تظهر المنحنيات كخطوط أفقية) كما هو مبين بالجزء العلوى الأيمن من الشكل (٢-٥). هذا للمخطط المذكور الذى يبين حالات الطاقة المسموح بها هو نموذج لمخطط نطاق طاقة أولى، والخط E_F يمثل أقل مستوى طاقة مسموح به فى نطاق التوصيل (قاع نطاق التوصيل CB)، بينما الخط E_V يمثل أعلى مستوى طاقة مسموح به فى نطاق التكافؤ (أى سقف نطاق التكافؤ VB). الفرق $E_F = E_C - E_V$ هو طاقة فجوة النطاق.

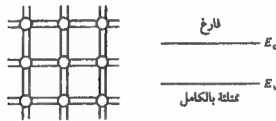
أخيرا يوضح الشكل (٢-٦) نموذج نطاق طاقة أولى والذى سنشاهده كثيرا. هذا المخطط المختصر للغاية يبين قاع نطاق التوصيل E_C وسقف نطاق التكافؤ E_V . يفهم ضمينا أن المحور الرأسى يمثل طاقة الإلكترون بوحدة مناسبة مثل eV ، بينما المحور الأفقى يمثل المسافة المقاسة بوحدة مناسبة مثل الميكرون μm . وهذه المحاور لا ترسم صراحة.



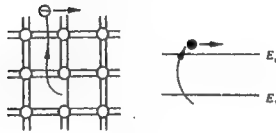
شكل (٢-٦) الصورة المبسطة وشاملة
الاستعمال لمخطط نطاق الطاقة

٢-٢-٢ حاملات الشحنة Charge Carriers

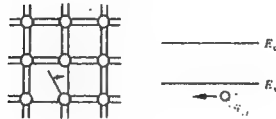
يمكننا الآن بعد أن أرسينا جيدا كيفية نمذجة أشباه الموصلات أن نُدخل في الصورة الكائنات الحاملة للتيار داخل شبه الموصل. بالنظر للشكل (٢-٧) نلاحظ عدم وجود حاملات شحنة وبالتالي لا إمكانية لسريان التيار؛ لأنه أساسا لا توجد روابط مكسورة. هذا من وجهة نظر نموذج الروابط. أما من وجهة نظر نموذج نطاقات الطاقة سنجد أن نطاق التكافؤ مشغول بالكامل ونطاق التوصيل خال تماما من الإلكترونات، وبالتالي لا تتوافر حاملات لسريان التيار. وعدم توافر الحاملات يتضح جليا في نموذج الروابط، لأنها -أي الحاملات- كلها مربوطة بذراتها، لكن نموذج نطاقات الطاقة يعطى صورة أدق؛ فعلى الرغم من الإشغال الكامل لنطاق التكافؤ بواسطة إلكترونات التكافؤ إلا أن



(١) لا حاملات



(ب) إلكترون



(ج) شفرة

شكل (٧-٢) تصوير الحاملات في نموذج الروابط (باليسار)، وفي نموذج نطاق الطاقة (باليمين)،

(١) في حالة اتساع وجود أية حاملات، (ب) تمثيل إلكترون، (ج) تمثيل شفرة

هذه الإلكترونات ليست ساكنة بل تتحرك بحرية عبر البلورة كلها. لكن هذه الحركة لا تسبب تيارا كهربيا؛ ذلك لأن لكل حالة كمية $quantum\ state$ من حالات النطاق الممتلئ بالكامل ستوجد حالة منازرة، لها كمية حركة مساوية للأولى ومعاكسة لها في الاتجاه. وبالتالي للحالتين معا يكون مجموع التيار صفرا. إذن بالنسبة للنطاق الممتلئ تماما بالحاملات تكون محصلة كمية حركة الحاملات مساوية للصفر. ومن ثم لا يمكن أن يعطى أى تيار.

الإلكترونات التي يمكن أن تؤدي إلى تيار مبنية بالشكل (٢-٧ ب). عندما تتكسر رابطة سيليكون-سيليكون ينطلق منها إلكترون حر يمكنه التجول خلال الشبكة، وعندئذ يشكل هذا الإلكترون «حاملة شحنة». يمكن وصف هذا من خلال نموذج نطاق الطاقة بالقول أن استثارة $excitation$ الإلكترونات من نطاق التكافؤ لنطاق التوصيل تولد حاملات، فالإلكترونات الموجودة في نطاق التوصيل تعتبر حاملات. لاحظ أن الطاقة المطلوبة لكسر رابطة في نموذج الروابط وطاقة فجوة النطاق E_g هما نفس الشيء، بالمثل الإلكترونات المتحررة من روابط مكسورة في نموذج الروابط هي نفسها الإلكترونات الموجودة في نطاق التوصيل في نموذج نطاق الطاقة. ومن الآن فصاعدا عندما نذكر كلمة «إلكترونات» بدون تخصيص فسنعني بها الإلكترونات الموجودة بنطاق التوصيل.

لا يولد تكسر رابطة سيليكون-سيليكون إلكترونات فقط، لكن في نفس الوقت تولد رابطة مفقودة أو فراغ شاغر في نظام الروابط. إذا فكرنا على غرار نموذج الروابط فستتحيل حركة الرابطة المفقودة هذه من موضع لآخر في الشبكة كلما قفز إلكترون من رابطة مجاورة ليملا الرابطة المكسورة تاركا خلفه رابطة مكسورة أخرى (انظر الشكل (٢-٧ ج)).

بدلا من تلك الصورة يمكننا تصور نفس الشيء من خلال نموذج نطاق الطاقة على أنه إزالة إلكترون تكافؤ من نطاق التكافؤ الممتلئ بعدد مهول ($4N$) من إلكترونات التكافؤ.

تتحرك الحالة الحالية الموجودة ضمن محيط ضخم من الحالات المشغولة كحركة فقاعة في سائل - في حرية تامة داخل الشبكة في عكس اتجاه الحركة التعاونية لعدد كبير من إلكترونات نطاق التكافؤ. فسواء تحدثنا عن رابطة مكسورة في نموذج الروابط أو عن حالة خالية في نطاق التكافؤ فنحن إزاء نفس الكائن: الشفرة- الحاملة الأخرى بجانب الإلكترون.

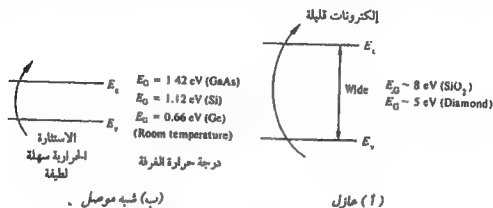
وبرغم أن ذلك ربما لا يكون واضحاً من المقدمة السابقة، لكن الشغرة فى نطاق التكافؤ والإلكترونون فى نطاق التوصيل لهما نفس الدرجة من الأهمية. فالإلكترونات والشغرات تشارك معا فى عمل النبائط شبه الموصلة. وربما فى بعض النبائط قد نجد أن الشغرة هى الحاملة الرئيسية فى النبيلة. وكلما توغلنا بدراستنا فى نمذجة الحاملات سيتضح لنا تصور أكبر وهو تساوى أهمية كل من الشغرات والإلكترونات، وسنجد أن من الشائع أن نتصور الشغرة كأنها جسيم تحت ذرى.

٢-٤ فجوة النطاق وتصنيف المواد

Band Gap and Material Classification

نختم الفقرة ٢ باستكشاف علاقة هامة بين فجوة الطاقة، وعدد الحاملات المتاحة للانتقال وتصنيف المادة البلورية. تخبرنا فيزياء الحالة الجامدة أن نموذج نطاق الطاقة يمكن أن يطبق على مواد أخرى غير أشباه الموصلات بعد إجراء تعديلات بسيطة. الفرق الرئيسى بين المواد البلورية ليس فى تفصيلات نطاقات الطاقة بل فى مقدار فجوة الطاقة بين النطاقين.

تتميز المواد العازلة كما هو مبين بالشكل (٢-٨) بفجوة نطاق واسعة. فمثلاً E_G فى حالة الماس (وهى مادة عازلة كهربياً) حوالى ٥ eV وفى حالة SiO_2 حوالى ٨ eV. فى مثل هذه المواد ذات فجوة الطاقة الكبيرة (أكبر من ٣ eV) تكون الطاقة الحرارية عند



شكل (٢-٨) تفسير الفرق بين: (١) العوازل، (ب) أشباه الموصلات، (ج) للمعادن باستخدام نموذج نطاق الطاقة.

درجة حرارة الغرفة غير كافية، وبالتالي عدد الإلكترونات التي يمكن استثارته من نطاق التكافؤ للتوصيل يظل ضئيلاً للغاية؛ ولذا تشكو هذه المواد من قلة الحاملات مما يجعلها مواد عازلة لا يمر فيها تيار محسوس وبالمقارنة فإن في حالة المعادن إما لا توجد فجوة طاقة من الأصل أو توجد فجوة طاقة صغيرة جداً (E_g) كسر صغير من الإلكترون فولت). في حالة عدم وجود فجوة الطاقة فإن نطاقى التكافؤ والتوصيل يتداخلان كما بالشكل (٢-٨ ج). ونظراً لعدم وجود فجوة الطاقة فإن كل إلكترونات التكافؤ الشاغلة للمستويات العليا في نطاق التكافؤ تعتبر حاملات. ووجود حاملات بهذه الأعداد الكبيرة يجعل الفلزات جيدة التوصيل للكهرباء. تقع أشباه الموصلات موقعا وسطا بين العوازل والفلزات. عند درجات حرارة الغرفة $T = 300 \text{ K}$ تكون E_g 1.42 eV في حالة GaAs، و 1.12 eV في حالة السيليكون، وأخيراً حوالي 0.66 eV في حالة الجرمانيوم.

والطاقة الحرارية في درجة حرارة الغرفة كافية لاستثارة أعداد من الإلكترونات لتصبح هناك حاملات في نطاقى التكافؤ والتوصيل؛ ولذا تكون قابلية توصيل التيار في أشباه الموصلات وسطا بين العوازل والفلزات.

(٢-٢) خواص حاملات الشحنة الكهربائية Carrier Properties

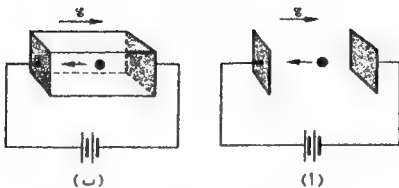
بعد أن تعرفنا على الإلكترون والشغرة سنقوم الآن بمعرفة أقصى ما يمكن معرفته عن طبيعة هذه الحاملات. في هذه الفقرة بالذات سنفحص الخواص العامة للحاملات وبعض المصطلحات.

١-٢-٢ الشحنة Charge

كل من الإلكترون والشغرة كيان مشحون. الإلكترون له شحنة سالبة $-q$ ، والشغرة لها شحنة موجبة $+q$ ، حيث $q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$. لاحظ أن q عبارة عن رقم موجب دائماً.

٢-٣-٢ الكتلة الفعالة Effective Mass

الكتلة، تماماً مثل الشحنة، خاصية أساسية للإلكترونات والشغرات. على عكس الشحنة، الكتلة ليست مجرد كمية عددية ثابتة ولكنها أعقد من ذلك. في الحقيقة كتلة الإلكترون الفعالة في بلورة تتغير بتغير نوع البلورة. أى أن الكتلة الفعالة للإلكترون في السيليكون غير الجرمانيوم ولا تساوى أى منهما كتلة الإلكترون الحر في الفراغ والتي تساوى $m_0 = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$.



شكل (٢-٩) إلكترون يتحرك تحت تأثير مجال كهربى
(١) فى الفراغ، (ب) داخل بلورة شبه موصل

لكى نسر غور مفهوم الكتلة الفعالة سيتعين علينا أولا أن نختبر حركة الإلكترون فى الفراغ. يتحرك الإلكترون فى الفراغ بكتلة m_0 تحت تأثير المجال الكهربى E الناشئ بين لوحى مكثف كما هو مبين بالشكل (٢-٩) القوة F التى يؤثر بها المجال هى حاصل ضرب الشحنة q فى المجال E ، من قانون نيوتن الثانى :

$$F = - q E = m_0 \frac{dv}{dt} \quad (2-2)$$

حيث v هى سرعة الإلكترون، t هو الزمن، بعد ذلك سنجعل الإلكترون يتحرك بنفس الطريقة لكن داخل بلورة شبه موصل كما بالشكل (٢-٩ب).

هل ستظل المعادلة (2-2) صالحة لوصف هذه الحالة؟ الإجابة هى بالنفى. فداخل شبه الموصل سيصطدم الإلكترون دوريا بذرات شبه الموصل مما يعرضه لمعجلة تقصيرية عقب كل تصادم.

سؤال آخر: هل يمكن تطبيق المعادلة (2-2) على الإلكترون أثناء تحركه بين ذرتين وقيل أن يحدث أى تصادم؟

الإجابة مرة أخرى بالنفى؛ لأن بالإضافة للمجال E هناك مجال كهربى آخر معقد ناتج عن ذرات البلورة وهذا المجال الإضافى غائب من المعادلة (2-2).

المناقشة السابقة تظهر بالتفصيل الفرق بين حركتى الإلكترون فى الفراغ وفي داخل شبه الموصل. ولكن المناقشة لا توضح كيفية التعامل مع حركة الإلكترون داخل البلورة.

إذا أردنا أن نتناول الموضوع بدقة متناهية فعلىنا أن ندع جانبا ميكانيكا نيوتن الكلاسيكية ونستخدم ميكانيكا الكم التى تناسب النظم الذرية. ولحسن الحظ إذا كانت

أبعاد البلورة كبيرة بالقياس بالأبعاد الذرية (تقاس الأبعاد الذرية بالإنجستروم) فإن المعالجة القائمة على ميكانيكا الكم يمكن اختزالها لمعادلة حركة شبيهة بالمعادلة (2-2) بعد استبدال الكتلة m_0 بالكتلة الفعالة للحاملة. أى أن المعادلة التى تصف الإلكترونات الميئة بالشكل (٩-٢) تكتب كالآتى:

$$F = -qE = m_n^* \frac{dv}{dt} \quad (2-3)$$

حيث m_n^* نرمز للكتلة الفعالة للإلكترون. ويمكن كتابة معادلة مشابهة للشغرة بعد استبدال $-q \leftarrow +q$ و $m_p^* \leftarrow m_n^*$. في كلتا الحالتين فإن المجالات الداخلية للبلورة وكذلك الاعتبارات الكمية قد تم أخذها بالاعتبار من خلال استبدال كتلة الإلكترون الحر في الفراغ بالكتلة الفعالة للحاملة داخل شبه الموصل. وهذه نتيجة هامة تسمح لنا بأن نعتبر الإلكترونات والشغرات كأنها شبه جسيمات كلاسيكية ومن ثم تمكنا من استخدام علاقات الجسيمات الكلاسيكية في تحليل عمل النبايط.

وبرغم أن صياغة الكتلة الفعالة هى تبسيط كبير للأمور، نجد أن معدل تسارع الحاملة يتغير بتغير اتجاه حركتها بالنسبة لاتجاهات محاور البلورة، أى أن الكتلة الفعالة لها قيم مختلفة حسب اتجاه الحركة أحيانا. والاکثر من ذلك فإن الخواص التى يمكن قياسها في المعمل تمحد أيضا الكتلة الفعالة، أى أن هناك كتل فعالة مختلفة للحاملة الواحدة في نفس شبه الموصل طبقا للخواص المقاسة. فمثلا توجد كتلة فعالة خاصة بالرنين السيكلتروني (حيث تدور الحاملة في مسار مغلق تحت تأثير مجال مغناطيسى عمودى على مستوى المسار). وتوجد كتلة فعالة خاصة بتجارب قياس الموصلية الكهربية، وكتلة فعالة ثالثة تدخل فى حسابات كثافة الحالات الكمية وهكذا. وربما لن تثير حقيقة أن الكتلة الفعالة تتغير أيضا بتغير درجات الحرارة دهشتنا بعد الآن. عموما الكتلة الفعالة التى سنستخدمها من الآن فصاعدا تسمى بالكتلة الفعالة المرتبطة بكثافة الحالات density of states والتى سنناقشها لاحقا (الفقرة ٢-٤-١) والجداول التالى يعطى الكتل الفعالة (الخاصة بكثافة الحالات) لكل من Si، Ge، GaAs عند درجة حرارة 300 K.

جدول (١-٢) الكتل الفعالة الخاصة بكثافة الحالات

المادة	m_n^* / m_0	m_p^* / m_0
Si	1.18	0.81
Ge	0.55	0.366
Ga As	0.066	0.52

٢-٣-٢ أعداد الحاملات في المواد الذاتية

Carrier Numbers in Intrinsic Material

يشيع استخدام مصطلح شبه الموصل الذاتي ليشير إلى عينة شبه الموصل الغاية في النقاء والتي لا تحتوي على تركيز ذي بال من ذرات الشوائب. بدقة أكبر فإن شبه الموصل الذاتي هو العينة التي خواصها هي الخواص الأصلية لمادة شبه الموصل، الخواص الذاتية التي لم تشوهها إضافات خارجية. وعدد الحاملات في شبه موصل ذاتي هي خاصية ذاتية لشبه الموصل نفسه.

نكتب بصفة عامة التعريفين :

n عدد الإلكترونات لكل cm^3

و p عدد الشواغر لكل cm^3 الموجودة داخل شبه موصل. في شبه الموصل الذاتي تحت ظروف الاتزان.

$$n = p = n_i \quad (2-4)$$

العدد n_i عند درجة حرارة الغرفة

$$n_i = \begin{cases} 2 \times 10^6 / \text{cm}^3 & \text{Ga As في} \\ 1 \times 10^{10} / \text{cm}^3 & \text{Si في} \\ 2 \times 10^{10} / \text{cm}^3 & \text{Ge في} \end{cases}$$

تتساوى n و p في شبه الموصل الذاتي لأن في المادة فائقة النقاء تتولد الإلكترونات والشغرات أرواجا. بالرجوع للشكل (٢-٧) سنرى أنه إذا انكسرت رابطة شبه موصل فإن إلكترونات حر وشغرة يولدان معا في نفس اللحظة. وفي نموذج نطاق الطاقة فإن استثارة إلكترون من نطاق التكافؤ ليصبح حاملة في نطاق التوصيل سيترك وراءه على الفور شغرة في نطاق التكافؤ. برغم أن عدد الحاملات لكل cm^3 في شبه الموصل الذاتي يبدو كبيرا كقيمة مطلقة فإنه في الواقع يعتبر ضئيلا جدا بالمقارنة بعدد الروابط التي يمكن كسرها بطرق مختلفة. فمثلا في السيليكون عدد الذرات هو $5 \times 10^{22} / \text{cm}^3$. وبما أن $n_i = 10^{10} / \text{cm}^3$ ، إذن في السيليكون عند درجة حرارة الغرفة توجد رابطة واحدة مكسورة كل 10^{13} رابطة. ربما إذا استطعنا ملء كل الصفحات البيضاء في العالم بمخططات نموذج الروابط سنجد مخططا وحيدا فقط برابطة مكسورة للسيليكون الذاتي عند درجة حرارة الغرفة.

٢-٤-٢-٤ متباينة أعداد الحاملات - الإشابة

Manipulation of Carrier Numbers - Doping

الإشابة أو التطعيم كمصطلح مرتبط بشبه الموصلات، هو إضافة كميات محكومة من ذرات شوائب معينة بقصد زيادة تركيز الإلكترونات أو الشغرات والمقصود بالتركيز هو عدد الأشياء لكل cm^3 . هذه الإضافة للكميات المتحكم بها تحدث روتينياً أثناء تصنيع أغلب النبائط شبه الموصلة. والشوائب الشائعة في حالة السيليكون موضحة بالجدول ٢-٢.

جدول (٢-٢) الشوائب الشائعة للسيليكون
السهم يشير للشوائب الأوسع استعمالاً

المتقبلات (شوائب تزيد الشغرات)	المانحات (شوائب تزيد الإلكترونات)
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> <p>B ←</p> <p>Ga</p> <p>In</p> <p>Al</p> </div> <div style="font-size: 3em; margin-right: 10px;">}</div> <div> <p>عناصر</p> <p>من العمود</p> <p>الثالث</p> </div> </div>	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> <p>P ←</p> <p>As ←</p> <p>Sb</p> </div> <div style="font-size: 3em; margin-right: 10px;">}</div> <div> <p>عناصر</p> <p>من العمود</p> <p>الخامس</p> </div> </div>

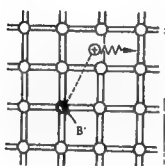
لزيادة تركيز الإلكترونات يمكن للمرء أن يضيف الفسفور P أو الزرنيخ As أو الأنثيمون Sb إلى بلورة السيليكون، وللعلم فإن أكثرها شيوعاً هو الفسفور ويليهِ مباشرة الزرنيخ. أما إذا أردنا زيادة تركيز الشغرات بالسيليكون نضيف البورون B (وهو الأكثر استخداماً)، أو الجاليوم Ga، أو الإنديوم In، أو الألومنيوم Al.

لكي نتفهم كيف أن إضافة ذرات الشوائب تقوم بالتحكم بأعداد الحاملات، علينا أن نلاحظ أن كل المانحات تنتمي للعمود الخامس بالجدول الدوري وكل المتقبلات تنتمي للعمود الثالث بالجدول الدوري.

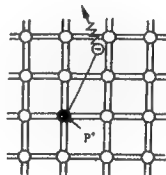
وكما هو موضح بالشكل (٢-١٠) الذي يصور نموذج روابط في حالة استبدال ذرة سيليكون بذرة من العمود الخامس بها خمسة إلكترونات تكافؤ. ترتبط أربعة من هذه الإلكترونات بجيرانها كالمعتاد بينما لا يجد الإلكترون الخامس مكاناً له في نظام الروابط (تذكر أنه توجد فقط أربع من الذرات الأقرب جيرة) وبالتالي يكون ارتباطه بالذرة المانحة ضعيفاً لدرجة أنه في درجة حرارة الغرفة تتوافر طاقة حرارية كافية للجعل

أعداد كبيرة من هذه الإلكترونات (الحامسة) تتحرر وتصبح حاملات تتجول بحرية في البلورة. ونلاحظ أن هذا المنح (من هنا تحىء تسمية مانحات) للحاملات الإلكترونية لن يزيد تركيز الشغرات. الأيون المانح (الذى هو ذرة مانحة بعد أن تحرر منها إلكترونها الخامس وأصبحت أيونا موجبا) لن يتحرك من موضعه، وبالتالي لا يصبح حاملا للتيار، كما أنه لن تنكسر روابط (من نوع رابطة ذرة - ذرة) عند تحرير الإلكترون الخامس.

يسير شرح عمل المتقبلة وفقا لنفس المنطق. فمستقبلات العمود الثالث لها ثلاثة إلكترونات تكافؤ، وبالتالي عندما تحمل ذرة متقبلة محل ذرة سيليكون، ستبقى رابطة مكسورة (أى بدون إلكترون تكافؤ) كما بالشكل (٢-١٠ ب) ذرة العمود الثالث ستقبل (ومن هنا تسمية المتقبلة) إلكترون من رابطة سيليكون-سيليكون مجاورة لكى تملأ رابقتها المكسورة (من هنا تتولد شغرة قادرة على التحرك فى كل البلورة (وتصبح حاملة موجبة الشحنة). هنا أيضا تحدث إضافة حاملة من نوع واحد دون النوع الآخر (توليد شغرة بدون توليد إلكترون). الأيون المتقبل السالب لن يتحرك من مكانه، وبالتالي لا يلعب دور حامل التيار كما أن عملية التقبل لم تولد إلكترونات حرة.



(ب)

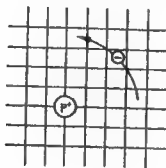


(١)

شكل (٢-١٠) تصوير قاحلية (أ) مانحة، و (ب) متقبلة باستخدام نموذج الروابط. فى (١) ذرة عنصر الفسفور (العمود الخامس) حلت محل ذرة سيليكون، وفى (ب) ذرة بورون (العمود الثالث) حلت محل ذرة السيليكون

التفسير السابق المبني على نموذج الروابط مفهوم بشكل معقول ولكنه يترك بعض الأمور معلقة. أحدها أننا ذكرنا أن الإلكترون الخامس يرتبط ضعيفا بالذرة المانحة وفى نفس الوقت يمكنه التجول بحرية خلال البلورة. فكيف يمكن تعريف مصطلح

«يرتبط بضعف»؟، أيضا يجب أن نعرف أنه عند درجة الحرارة T يتوفر لكل جسيم طاقة حرارية قيمتها المتوسطة kT حيث k هو ثابت بولتزمان. عند درجة حرارة الغرفة يبلغ متوسط الطاقة الحرارية حوالي $\frac{1}{40}$ من الإلكترون فولت. وتحتاج رابطة سيليكون-سيليكون طاقة مقدارها E_g لكى تنكسر أى حوالى 1 eV ، وبالتالي لا ينكسر سوى عدد صغير من هذه الروابط عند $T = 300\text{ K}$ (حوالى $n_i = 10^{10}$ رابطة مكسورة). فهل مصطلح «مرتبطة بضعف» يعنى طاقة ربط حوالى 0.1 eV أو أقل؟ ربما، سؤال آخر: كيف يمكن تصوير فعل ذرات الإشابة باستخدام نموذج نطاق الطاقة؟ السؤالان مرتبطان بعضهما ببعض؛ لأنهما يتناولان اعتبارات الطاقة.



شكل (٢-١١) نموذج شبكية ذرة الهيدروجين لوصف رابطة موضع مانحة

دعونا نركز أولا على طاقة ربط الإلكترون الخامس. يمكن القول مجازا أن لب الذرة المانحة المشحونة بالإضافة للإلكترون الخامس يشبهان ذرة الهيدروجين. لب الذرة المانحة يعمل كنواة ذرة الهيدروجين (كما بالشكل ٢-١١) والإلكترون الخامس كإلكترون ذرة الهيدروجين. طبعا فى ذرة الهيدروجين الحقيقية يتحرك الإلكترون فى الفراغ، وبالتالي فإن كتلته هى كتلة الإلكترون الحر فى الفراغ m_0 ، وطبقا للمعادلة 1-2 فإن طاقة الربط للحالة الأرضية هى 13.6 eV . أما فى حالة الذرة المشابهة (اللب + الإلكترون الخامس) تستبدل سماحية الفراغ ϵ_0 بسماحية السيليكون $K_s \epsilon_0$ ، أيضا تستبدل الكتلة m_0 بالكتلة الفعالة فى السيليكون m_n ؛ لأن الإلكترون الخامس يتحرك داخل بحر من ذرات السيليكون وليس فى الفراغ. نستنتج بالتالى أن طاقة ربط (E_n^*) إلكترون المانحة الخامس هى تقريبا

$$E_n^* = - \frac{m_n^* q^4}{2 (4\pi K_s \epsilon_0 h)^2} = - \frac{m_n^*}{m_0} \frac{1}{K_s} (13.6\text{ eV}) \approx - 0.1\text{ eV} \quad (2-5)$$

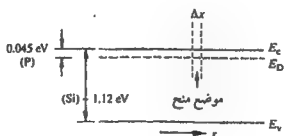
حيث K_f هو ثابت العزل dielectric constant للسيليكون ($K_f=11.8$). طاقات الربط الفعلية للمانحات موضحة بالجدول الآتي:

جدول (٢-٣) طاقة الربط بمواضع المنح بالإلكترون فولت

المانحات	$ E_B $	المتقبلات	$ E_B $
Sb	0.039	B	0.045
P	0.045	Al	0.087
As	0.054	Ga	0.072
		In	0.16

طاقات الربط الفعلية والتي قيست معمليا تتماشى إلى حد ما مع التقدير المحسوب من المعادلة (2-5) وتساوى تقريبا $1/20$ من الإلكترون فولت (القيمة المحسوبة حوالي $1/10$ من الإلكترون فولت).

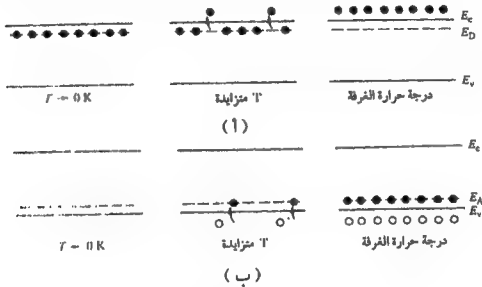
بعد تقدير طاقات الربط كميًا ننتقل الآن لمعالجة مسألة كيفية تصوير فعل المانحات من خلال نموذج نطاق الطاقة. نلاحظ أولا أن الإلكترون الخامس يحتاج لطاقة E_B لكي يترك موضع المنح وليظهر في نطاق التوصيل كحاملة. فإذا توافر لهذا الإلكترون طاقة E_B بالضبط، أمكنه الوصول بالكاد إلى قاع نطاق التوصيل أى إلى المستوى E_C . ويقودنا هذا إلى التسليم بأن الإلكترون الخامس أثناء ارتباطه بالذرة المانحة له سيحتل مستوى طاقة مسموح به ويقع بالضبط تحت E_C بمقدار E_B ، أو كما هو مبين بالشكل (٢-١٢)



شكل (٢-١٢) إضافة مستوى طاقة مانحة $E = E_D$ لمخطط طاقة النطاق، علامات الشرطة باتساع Δx تؤكد على طبيعة أن حالات مواضع المانحات موضعية أى تمتد لدى محدود

يمكن توصيف مواضيع المنح خلال نموذج نطاق الطاقة بإضافة مستويات إلكترونية عند الطاقة $E_D = E_C - E_B$. لاحظ أن مستوى طاقة المانحة يرسم على هيئة خط مستقطع وتعني كل شرطة في الخط إلى أن الإلكترون المنتمي للمانحة سيكون مقيدا ويبقى مجال حركته محدودا بموضع المنح طالما أنه لم ينطلق بعد. وأنه فقط عندما ينال طاقة E_B يصبح طليقا ويكون الفرق $E_C - E_D$ هو E_B ويقدر بحوالى 1.12 eV ، وبالتالي يكون المستوى E_D قريبا جدا من المستوى E_C (تذكر أن $E_C - E_V$ يساوى E_G أى 1.12 eV).

التصور الشائع لفعل المنح من خلال نموذج نطاق الطاقة موضح بالشكل (٢-١١٣) بالناحية اليسرى من الشكل، نجد أن كل مواضع المانحات مشغولة بالإلكترونات المقيدة



شكل (٢-١١٣) تصوير لفعالية (أ) مانحة و (ب) مقبلة باستخدام نموذج نطاق الطاقة

وذلك عند انخفاض درجات الحرارة $T \rightarrow 0K$. وهذا ما يحدث في الواقع؛ لأنه عند درجات الحرارة المنخفضة لا تتوفر طاقة حرارية كافية (kT) لاستثارة الإلكترونات المقيدة بمواقع المانحات إلى نطاق التوصيل. ويبدأ الوضع في التغير مع ارتفاع درجة الحرارة فنجد أن المزيد من الإلكترونات المقيدة يتحرر نحو نطاق التوصيل (انظر الجزء الأوسط في الشكل). وعند درجة حرارة الغرفة تتأين كل الذرات المانحة بعد أن تمنح كل إلكتروناتها الخامسة لنطاق التوصيل. (الجزء الأيمن بالشكل). بالرغم من أننا ركزنا على المانحات إلا أن نفس الشيء يسرى على المقبلات. فكما هو واضح من الشكل (٢-١١٣ ب) فإن المقبلات تنشئ مستويات ذرية مسموحا بها فوق سقف نطاق التكافؤ E_V مباشرة وداخل فجوة الطاقة عند درجات الحرارة المنخفضة كل المواضع تكون خالية

لعدم وجود طاقة حرارية كافية عندما تتول T إلى الصفر المطلق لنقل إلكترون تكافؤ إلى موضع المستقبل. ومع ارتفاع درجة الحرارة يزداد عدد الإلكترونات التكافؤ التي تقفز للروابط غير المكتملة للذرات المستقبل. وكل إلكترون يقفز للذرة متقبلة يخلق مكانه شغرة، أى أن انتزاع الإلكترونات من نطاق التكافؤ يخلق شغرات بالطبع. وعند درجة حرارة الغرفة تمثل تقريباً كل مواضع المستقبلات بالإلكترونات التكافؤ ونتيجة لذلك يزداد تركيز الشغرات بالمادة.

قبل أن نختم هذه الفقرة الفرعية نود أن ننوه بوضع كلمات عن إشابة أشباه الموصلات غير العنصرية (أى المركبة مثل GaAs). إشابة شبه موصل مثل GaAs تشبه إشابة السيليكون فيما عدا بعض التعقيدات بسبب وجود موضعين مختلفين للذرتى المركب. فالذرات من العمود السادس (VI) مثل الكبريت S، والسيلينيوم Se، والتيلوريوم Te، -وكما رأينا فى حالة السيليكون- تلعب دور المانحات عندما تحل محل ذرة الزرنيخ (التي تنتمى للعمود الخامس) فى GaAs. وبالمثل ذرات العمود الثانى مثل البيريليوم Be، والمغنسيوم Mg، والزنك Zn تقوم بدور المستقبلات إذا ما استبدلت ذرة الجاليوم (من العمود الثالث) فى GaAs. لكن ينشأ وضع جديد إذا حلت ذرة من العمود الرابع (سيليكون أو جرمانيوم) فى GaAs. يحل السيليكون عادة محل الجاليوم؛ ولذا يعتبر مانحاً مشهوراً لإشابة GaAs، ولكن تحت شروط معينة يمكن للسيليكون أن يحل محل الزرنيخ فى GaAs ليلعب دور المستقبل. فى الحقيقة وصلات pn فى زرنيخيد الجاليوم (GaAs) تصنع بإضافة السيليكون ليؤدى وظيفة المانع فى الناحية n ووظيفة المستقبل فى الناحية p . تسمى الشائبة التي يمكن أن تقوم بدور المانع والمستقبل معا بالشائبة الأمفوتيرية amphoteric.

مثال ١-٢ :

أسئلة سريعة عن الطاقة :

١ - كم يساوى 1eV مقدرًا بالجول ؟

ب- كم تساوى kT بالإلكترون فولت عند 300K ؟

ج- $E_G(\text{Si})$ تساوى — ؟

د - $E_G(\text{SiO}_2)$ تساوى — ؟

هـ- طاقة التأين للمستقبلات والمانحات فى السيليكون تساوى تقريباً — ؟

و - الطاقة اللازمة لتأين ذرة هيدروجين فى الحالة الابتدائية $n=1$ هى — ؟

الإجابة :

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ joules}$$

$$kT = (8.617 \times 10^{-5}) (300) \quad T = 300 \text{ K} \quad \text{ب- عند}$$

$$= 0.0259 \text{ eV}$$

$$\text{هنا استعملنا ثابت بولتزمان } k = 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$$

$$\text{ج- من المقطع الفرعى } 2-2-4 : E_G(\text{Si}) = 1.12 \text{ eV}$$

$$\text{د - وأيضا } E_G(\text{Si O}_2) = 8 \text{ eV}$$

هـ- طاقة التأين للشوائب تساوى (E_B) والتى بدورها تساوى تقريبا 0.1 eV فى السيليكون.

و - من المعادلة 2-1 فى الفقرة 2-2 طاقة التأين لذرة الهيدروجين هى :

$$E_{II} \Big|_{n=1} = 13.6 \text{ eV}$$

٥-٣-٢ مصطلحات متعلقة بالحاملات Carrier-Related Terminology

من المناسب أن نختم هذه الفقرة بمراجعة عامة للمصطلحات المتعلقة بالحاملات وتعريفاتها، هذه المصطلحات واسعة الاستخدام وتعريفاتها يجب أن تحفظ عن ظهر قلب.

- المشيبات (المطعمات) Dopants

هى ذرات شوائب خاصة تضاف لشبه الموصل بمقادير بالغة الدقة بغرض زيادة تركيزات أى من الإلكترونات أو الشغرات.

- شبه الموصل الذاتى Intrinsic semiconductor

هى عينة شبه الموصل التى لم تشاب والبالغة النقاء ولا تحتوى على أى شوائب تستحق الذكر، وبالتالي فإن خواصها هى خواص شبه الموصل ذاته دون انتهاك.

- شبه الموصل المكتسب Extrinsic semiconductor

هو شبه الموصل المشاب والذى اكتسب خواص جديدة بعد إضافة ذرات شوائب إليه.

- المانحة Donor

هى ذرة شائبة تزيد تركيز الإلكترونات فى شبه الموصل ويقال لها شائبة من النوع "n".

- المتقبلة Acceptor -

هى ذرة شائبة تزيد تركيز الشغرات وتسمى شائبة من النوع p .

- مادة من نوع n n -type material

هى المادة المشابة بالمناحاح، وهى شبه موصل فيه الإلكترونات أكثر وفرة من الشغرات.

- مادة من نوع p p -type material

هى المادة المشابة بالمتقبلات، وهى شبه موصل فيه الشغرات أكثر وفرة من الإلكترونات.

- حاملة أقلية Minority carrier

الحاملة الأقل عدد فى عينة شبه الموصل، الشغرات فى مادة من النوع n ، والإلكترونات فى مادة من نوع p .

- حاملة أغلبية Majority carrier

الحاملة الأكثر عددا فى عينة شبه الموصل، الإلكترونات فى مادة من النوع n ، والشغرات فى مادة من نوع p .

(٢-٤) توزيعات الحالات والحاملات

State and Carrier Distributions

حتى الآن ركزنا عند اهتمامنا بعملية النمذجة على خواص ومعلومات عن الحاملات على مستوى المفاهيم والمعالجة النوعية أو شبه الكمية على الأكثر. من الناحية العملية توجد حاجة لمعلومات تفصيلية أكثر. مثلا معظم أشباه الموصلات مشابة ومن المهم روتينيا أن نعرف بدقة القيم العددية لتركيزات الحاملات داخل أشباه الموصلات المشابة، كذلك نحتاج لفحص خاصية هامة ألا وهى توزيع الحاملات كدالة فى الطاقة، لكل نطاق على حدة. فى هذه الفقرة نبدأ بتفصيل أكثر عملية تطوير وصف التعداد السكانى للحاملات. سيؤدى هذا التطوير فى النهاية إلى علاقات تحصى توزيعات الحاملات وتركيزاتها داخل شبه الموصل تحت ظروف الاتزان.

٢-٤-١ كثافة الحالات Density of States

عند تقديم نموذج نطاق الطاقة لأول مرة فى الفقرة ٢-٢ أشرنا إلى أن العدد الكلى للحالات المسموح بها فى كل نطاق هو أربعة أمثال عدد ذرات البلورة، لكننا لم نذكر كيف تتوزع هذه الحالات مع الطاقة، أى ما هو عدد الحالات الواقعة فى مدى طاقة معين داخل نطاق التكافؤ أو التوصيل. حان الآن وقت الاهتمام بهذا التوزيع للحالات عند قيم مختلفة للطاقة أى بكثافة الحالات وهو الاسم الشائع لهذا التوزيع، فمعرفة هذا التوزيع أساسى لتحديد توزيع الحاملات وتركيزاتها.

لتحديد كثافة الحالات المطلوبة من الضروري أن نجرى تحليلاً مبنياً على اعتبارات ميكانيكا الكم.

سنعطى هنا نتيجة هذا التحليل بإيجاز، فالطاقات التي ليست بعيدة جداً عن حواف النطاقين نجد أن :

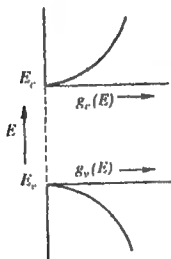
$$g_C(E) = \frac{m_n^* \sqrt{2 m_n^* (E - E_C)}}{\pi^2 \hbar^2}, \quad E \geq E_C \quad (2-6-a)$$

$$g_V(E) = \frac{m_p^* \sqrt{2 m_p^* (E_V - E)}}{\pi^2 \hbar^2}, \quad E \leq E_V \quad (2-6-b)$$

حيث $g_C(E)$ و $g_V(E)$ هما كثافتا الحالات عند الطاقة E في نطاق التوصيل والتكافؤ على التوالي.

ما الذي يجب بالضغط معرفته وتذكره حول كثافة الحالات المذكورة أعلاه؟ أولاً، يجب استيعاب المفهوم العام لكثافة الحالات. يمكن تشبيه كثافة الحالات بتوصيف المقاعد في الاستاد، حيث إن عدد المقاعد التي تبعد مسافة معينة من الملعب ستناظر عدد حالات الطاقة الواقعة داخل مدى معين، وهذا المدى يبعد عن E_C أو E_V بطاقة معينة E .

ثانياً، يجب ملاحظة الشكل العام للمعادلة (2-6) وكما هو موضح بالشكل (١٤-٢) $g_C(E)$ تساوى صفراً عند $E = E_C$ وبعد ذلك تزيد كدالة جذر تربيعي كلما



شكل (١٤-٢) الكثافة العامة لاعتماد $g_V(E)$ و $g_C(E)$ على الطاقة قرب حواف النطاقين. $g_C(E)$ و $g_V(E)$ هي كثافة الحالات في نطاقي التوصيل والتكافؤ على الترتيب

صعدنا لأعلى في نطاق التوصيل. وبالمثل $g_v(E)$ تساوى صفر تماماً عندما $E = E_v$ وتزايد كجذر تربيعي كلما نزلنا لأسفل في نطاق التكافؤ. لاحظ أن الفرق بين $g_c(E)$ و $g_v(E)$ ناتج عن اختلاف الكتل الفعالة في الحالتين. ولو تساوت الكتل فإن $g_c(E)$ و $g_v(E)$ ستساويان.

أخيراً لنأخذ المدى الصغير جداً بين الطاقة E والطاقة $E + dE$ في النطاقين، يمكننا القول أن :

$g_c(E)dE$ تمثل عدد حالات نطاق التوصيل لكل cm^3 والواقعة بين E ، $E + dE$ إذا كانت $E \geq E_c$.

$g_v(E)dE$ تمثل عدد حالات نطاق التكافؤ لكل cm^3 والواقعة بين E ، $E + dE$ إذا كانت $E \leq E_v$.

إذن $g_c(E)$ و $g_v(E)$ هما عدد لكل وحدة حجم لكل وحدة طاقة وعادة ما يعبر عنهما بالوحدة eV / cm^3 .

٢-٤-٢ دالة فرمي The Fermi Function

بينما تخبرنا كثافة الحالات بعدد الحالات المسموح بها عند طاقة معينة E ، سنجد أن دالة فرمي $f(E)$ هي التي تحدد احتمال احتلال أي حالة من هذه الحالات بأى إلكترون، أى أن:

$f(E)$ تحدد تحت ظروف الاتزان احتمال أنه توجد حالة متاحة (أى مسموح بها) عند الطاقة E ستشغل بالإلكترون.

رياضياً، دالة فرمي ببساطة هي دالة التوزيع الاحتمالي. والتعبير الرياضى لها هو:

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}} \quad (7-2)$$

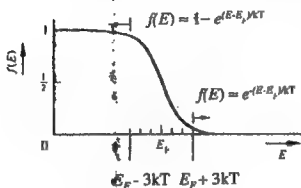
حيث إن :

E_F هي ثابت طاقة فرمي أو مستوى فرمي.

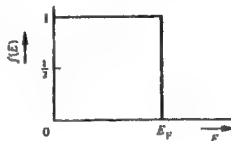
k ثابت بولتزمان $k = 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$.

T درجة الحرارة المطلقة بالكلفن K .

ولكى نسير غور طسيعة دالة فرمى؛ دعونا نبدأ ببحث نعيمر هذه الدالة مع الطاقة E . تبدأ بدرجات الحرارة المنخفضة أى عندما $T \rightarrow 0 \text{ K}$ فإن $(E - E_F)/kT \rightarrow \infty$ لكل $f(E < E_F)$ ، وبالتالى $f(E > E_F) \rightarrow 0$ لكل $f(E > E_F)$ ، وكذلك $f(E < E_F) \rightarrow 1$ أى أنه عند $T = 0 \text{ K}$ يحدث هيوط مفاجئ من 1 إلى 0، وبالتالى فإن الحالات التى لها $E < E_F$ كلها تكون مشغولة، ($f=1$) والحالات التى طاقتها $E > E_F$ كلها خاوية، ($f=0$) وذلك عند درجة حرارة الصفر المطلق. كما هو مبين بالشكل (٢-١٥).



(ب)



(١)

شكل (٢-١٥) اعتماد دالة فرمى على الطاقة

(١) عندما $T \rightarrow 0 \text{ K}$

(ب) المنحنى العام عند $T > 0 \text{ K}$

ننتقل الآن إلى درجة الحرارة $T > 0 \text{ K}$ ، بالنظر مليا لدالة فرمى سنلاحظ عدة أمور:

١- إذا كان $E = E_F$ إذن $f(E_F) = 1/2$.

٢- عندما $E \geq E_F + 3kT$ فإن $\exp[(E - E_F)/kT]$ تصبح أكبر كثيرا من الواحد الصحيح، وبالتالى $f(E) \approx \exp[-(E - E_F)/kT]$ أى أن فوق $E_F + 3kT$ ، فإن احتمال إشغال مستوى الطاقة سيضمحل أسيا إلى الصفر مع زيادة الطاقة. ونستنتج أن معظم الحالات التى طاقتها أعلى بمقدار $3kT$ فوق E_F ستكون خالية.

٣- بالعكس عندما $E \leq E_F - 3kT$ فإن $\exp[(E - E_F)/kT] \ll 1$ ، وبالتالى $f(E) \approx 1 - \exp[(E - E_F)/kT]$ ، وبالتالى عندما تكون الطاقة E أقل من $E_F - 3kT$ فإن

احتمال أن تكون حالة الطاقة خالية سيؤول أسيا للصفر مع نقصان الطاقة. أى أن معظم الحالات التى طاقتها تحت E_F بمقدار $3kT$ ستكون مشغولة.

٤- عند درجة حرارة الغرفة ($T = 300K$) فإن $kT = 0.0259 \text{ eV}$ و $3kT = 0.0777 \text{ eV}$ أى أن: $3kT \ll E_G(\text{Si})$ أى أنه بالمقارنة بفجوة طاقة السيليكون فإن $3kT$ - التى تلعب دورا هاما فى تصرف الدالة $f(E)$ هى فى الواقع حزام ضيق من الطاقة.

الخواص التى فرغنا للتو من سردها للدالة $f(E)$ تظهر جليا ويلخصها الرسم المعروض فى الشكل (٢-١٥ ب).

قبل أن نختم المناقشة هنا نعيد التأكيد على أن دالة فرمى تنطبق فقط فى ظروف الاتزان ولا بد أن نذكر أن دالة فرمى عامة جدا، بمعنى أنها تنطبق على كل المواد - عازلة، شبه موصلة، موصلة، وبالرغم أننا تناولناها هنا فى سياق أشباه الموصلات لكنها فى الحقيقة لا تتغير بتغير نوع شبه الموصل فهى دالة إحصائية تنطبق على كل النظم الإلكترونية، وأخيرا فإن موضع مستوى فرمى E_F بالنسبة لحواف النطاقين E_C ، E_V هو موضوع هام ونعالجه فى المقاطع الفرعية اللاحقة.

مثال ٢-٤:

نفترض أن الحالة التى عند الحافة E_C احتمال إشغالها يساوى احتمال خلو الحالة عند الحافة E_V . أين يقع مستوى فرمى؟

الحل :

$$f(E_C) = 1 - f(E_V)$$

$$f(E_C) = \frac{1}{1 + e^{(E_C - E_F)/kT}} \quad \text{لكن :}$$

$$1 - f(E_V) = 1 - \frac{1}{1 + e^{(E_V - E_F)/kT}} = \frac{1}{1 + e^{(E_F - E_V)/kT}} \quad \text{وأيضا :}$$

$$\frac{E_C - E_F}{kT} = \frac{E_F - E_V}{kT} \quad \text{إذن نستنتج أن :}$$

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} \quad \text{أى :}$$

مستوى فرمى فى منتصف المسافة بين E_C و E_V .

مثال ٢-٣:

اكتب برنامج حاسب باللغة التى تعرفها لرسم $f(E)$ عند درجات الحرارة 100،

200، 300 كلفن، اجعل المحور الأفقى هو $E = E - E_F$ وحدود E من $-0.2V$ إلى $+0.2V$. اجعل كل المنحنيات فى مخطط واحد.

الحل :

إذا اخترنا لغة البرمجة Matlab فإن البرنامج والرسم يكونان كالتالى :

S: MATLAB program script ...

%Fermi Function Calculation, $f(\Delta E, T)$

% Constant

$k=8.617e-5$;

%Computation proper

for ii=1:4;

$T=100*ii$;

$kT=k*T$;

$dE(ii,1)=-5*kT$;

for jj=1:101

$f(ii,jj)=1/(1+\exp(dE(ii,jj)/kT))$;

$dE(ii,jj+1)=dE(ii,jj)+0.1*kT$;

end

end

$dE=dE(:,1:jj)$; %This step strips the extra dE value

close

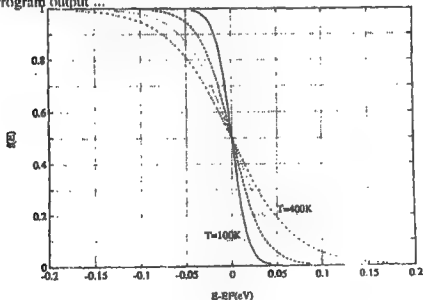
plot(dE,f'); grid; %Note the transpose (') to form data columns

xlabel('E-EF(eV)'); ylabel('f(E)');

text(.05,.2,'T=400K'); text(-.03,.1,'T=100K');

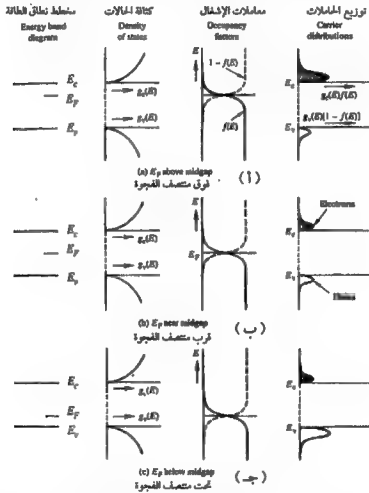
برنامج مثال (٢-٣)

Program output ...



٢-٤-٣ توزيع الاتزان للحاملات Equilibrium Distribution of Carriers

بعد أن أرسينا قواعد توزيع حالات النطاق المتاحة، وكذلك احتمال إشغالها تحت ظروف الاتزان، أصبح في مقدورنا الآن أن نستنبط توزيع الحاملات كلي في نطاقه. وبالتحديد فإن التوزيع المطلوب يمكن الحصول عليه ببساطة كحاصل ضرب كثافة الحالات المناسبة في احتمال الإشغال المناسب مثلاً: $g_C(E)f(E)$ يعطى توزيع الإلكترونات في نطاق التوصيل كما أن: $g_V(E)[1-f(E)]$ سيعطى توزيع الشغرات (أي الحالات الخالية) في نطاق التكافؤ. ويصور شكل (٢-١٦) عينات من توزيع الحاملات لأوضاع ثلاثة مختلفة لمستوى فرمي (وكذلك مخطط نطاق الطاقة المرتبطة بها ورسم دالة فرمي ورسم كثافة الحالات كلها).



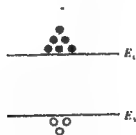
شكل (٢-١٦) توزيع الحاملات (ليست مرسومة بمقياس رسم موحد)

في كل نطاق على حدة عندما يقع مستوى فرمي

- ١ - فوق منتصف الفجوة. ب- قرب منتصف الفجوة. ج- تحت منتصف الفجوة. موضع أيضاً بالتناسق منحنيات لمخططات نطاق الطاقة، كثافة الحالات، ومعاملات الإشغال (دالة فرمي و واحد صحيح ناقص دالة فرمي)

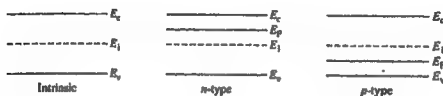
يفحص الشكل (٢-١٦) منجد بصفة عامة أن كل توزيعات الحاملات تتول للصفر عند حافتي النطاقين ثم تصل لأقصى مدى لها قرب هاتين الحافتين E_c أو E_v . وبعد ذلك تضمحل سريعا للصفر عندما نتحرك لأعلى في نطاق التوصيل أو لأسفل في نطاق التكافؤ. أى أن أغلب الحاملات تتجمع في حزام طاقة صغير قرب حافتي النطاقين. النقطة الأخرى نلاحظ تأثير موضع مستوى فرمى على المقدار النسبى لتوزيع الحاملات. إذا كان E_F قريبا من E_c (أى فوق منتصف المسافة بين E_c و E_v) نجد أن توزيع الإلكترونات يفوق عددا توزيع الشغرات، السبب فى هذا هو دالة فرمى عندما تكون E_F بالنصف العلوى لفجوة الطاقة يضمحل احتمال إشغال الإلكترونات $f(E)$ بدرجة أقل بكثير من اضمحلال احتمال وجود شغرة $[1-f(E)]$ أى أن قيمة $f(E)$ حيث E تنتمى لنطاق التوصيل أكبر بكثير من قيمة $1-f(E)$ حيث E تنتمى لنطاق التكافؤ فى حالة تواجد E_F فوق منتصف الفجوة. عندما يكون E_F قريبا من منتصف الفجوة يتساوى العاملان $f(E > E_c)$ و $1-f(E < E_v)$ ، وبالتالي يكون توزيع الإلكترونات فى نطاق التوصيل والشغرات فى نطاق التكافؤ متساويين. وإذا هبط E_F لتصبح قريبا من E_v تنعكس الأمور ويزداد توزيع الشغرات بالمقارنة بتوزيع الإلكترونات. طبعا المنطق هنا يفترض أن التوزيعين $g_c(E > E_c)$ و $g_v(E < E_v)$ متقاربان من حيث المقدار، ونطمئن القارئ أن هذا الافتراض يتحقق فى حالة السيليكون (وأيضا فى الجرمانيوم) أساسا؛ لأن الكتل الفعالة للإلكترون والشغرات متقاربان. وطبعا نفترض هنا أن E_F داخل الفجوة وبعيدا عن الحافتين بما لا يقل عن $3kT$ أى أن $E_F + 3kT \geq E_v$ و $E_F - 3kT \leq E_c$ (تذكر ما قلناه فى المقطع الفرعى السابق عن الاضمحلال الأسى لدالة فرمى).

تستخدم المعلومات التى ذكرت للتو حول توزيعات الحاملات ونسبة تعداد الحاملات بالنطاقين على نطاق واسع، لكن غالبا ما تقدم هذه المعلومات فى شكل مختصر وموجز. فمثلا الشكل (٢-١٧) هو أحد الطرق المعتادة لتمثيل توزيع طاقات الحاملات.



شكل (٢-١٧) مخطط يمثل توزيع طاقة الحاملات

فالعدد الأكبر من الدوائر أو النقط المرسومة بجوار E_c و E_v تعكس أن القيمة العظمى لتوزيع الحاملات توجد قرب حافتي النطاقين وتناقص عدد النقط كلما ارتفعنا داخل نطاق التوصيل. نموذج بشكل فج النقصان السريع في كثافة الإلكترونات مع ازدياد الطاقة. إحدى الوسائل المستخدمة بشكل شامل للإفادة عن أعداد الحاملات في النطاقين موضحة بالشكل (١٨-٢)، لتمثيل مادة ذاتية برسم خط متقطع قرب منتصف فجوة الطاقة ويرمز له بالرمز E_i . وجود E_i قرب المنتصف (هنا E_i هو مستوى فرمي E_F) ينسجم مع ما عرفناه سابقاً من تساوى أعداد الإلكترونات والشحرات عندما يكون مستوى فرمي E_F قرب منتصف فجوة النطاق. بالمثل، فإن وجود E_F كخط مستمر بالنصف العلوى للفجوة ينبئنا على الفور أن المادة هي شبه موصل من النوع n ، أما وجود خط مستمر يرمز له بالرمز E_F بالنصف السفلى للفجوة فيدل على شبه موصل من النوع p . في أشباه الموصلات المكتسبة يظهر الخط المتقطع E_i قرب منتصف الفجوة ليدل على أن شبه الموصل مكتسب (أي من النوع n أو p)، والخط E_i في هذه الحالة يشير إلى موضع E_F إذا كانت المادة ذاتية كما أن E_i سيخدم كمرجع لقياس الطاقة من منتصف الفجوة.



شكل (١٨-٢) تمثيل «بمجرد النظر» للمواد شبه الموصلية الذاتية (على اليسار)، ومن النوع n (بالوسط)، ثم من النوع p (على اليمين) باستخدام نموذج نطاق الطاقة

(٥٤) تركيز الحاملات عند الاتزان

Equilibrium Carrier Concentrations

وصلنا الآن لنقطة هامة بعملية نمذجة الحاملات. تجسد هذه الفقرة ذروة مجهودنا في النمذجة، حيث تؤسس للعلاقات العملية لتركيزات الحاملات عند الاتزان متممة للمعلومات الكيفية التي قدمت عن الحاملات في الفقرة السابقة. لسوء الحظ، فإن التأكيد على تطوير العلاقات الرياضية يجعل الهجوم على الذروة أمرا شاقا (وأحيانا مملا). نأمل أن يحتفظ قارئنا بتركيزه. ملاحظة أخرى عن تقديم أشكال بديلة لعلاقات الحاملات. هذه الأشكال البديلة يمكن تشبيهها «بمفاتيح العدة» المختلفة التي يستخدمها الحرفي عند إصلاح ماكينة عاطلة. فهو قد يستعمل عدة مفاتيح لنفس الصامولة مثل المفتوح الطرفين (الإنجليزي) أو المقفول (المشرشر) أو الانبوي الشكل (الماسورة أو الصامولة) في بعض الاستخدامات يمكنه أن يستعمل أيها من المفاتيح. لكن في استخدامات أخرى يستحسن أن يستخدم نوعا بعينه. نفس الشيء ينطبق على الأشكال البديلة. أخيرا سنضع مستطيلا حول العلاقات الهامة. المستطيل بخط مفرد يدل على أهمية متوسطة أما المستطيل بخط مزدوج فيشير للعلاقة المهمة جدا.

١-٥-٢ صيغ رياضية لقيم n, p (Formulas for n and p)

حيث إن $g_v(E) dE$ تمثل عدد حالات نطاق التوصيل لكل cm^3 الواقعة داخل المدى من E وحتى $E + dE$ ، وحيث إن $f(E)$ تمثل احتمال أن يحتل الإلكترون حالة مسموح بها عند الطاقة E ، إذن فإن $g_v(E) f(E) dE$ تعطى عدد إلكترونات نطاق التوصيل لكل cm^3 الواقعة طاقاتها في المدى من E وحتى $E + dE$. وإذا كاملنا $g_v(E) f(E) dE$ على كل مدى طاقة نطاق التوصيل سنحصل على العدد الكلي للإلكترونات في نطاق التوصيل. نستنتج إذن :

$$n = \int_{E_i}^{E_{top}} g_v(E) f(E) dE \quad (2-8-a)$$

$$p = \int_{E_{bottom}}^{E_i} g_v(E) [1 - f(E)] dE \quad (2-8-b)$$

للوصول لتعابير واضحة لتركيزات الحاملات، سنركز مجهوداتنا على التكامل n (وسندع التكامل p للقارئ للتمرين). سنعوض من المعادلة (2-6-a) عن $g_C(E)$ ومن المعادلة (2-7) عن $f(E)$ في المعادلة (2-8-a).

فنحصل على:

$$n = \frac{m_n^* \sqrt{2 m_n^*}}{\pi^2 \hbar^3} \int_{E_C}^{E_{\eta p}} \frac{\sqrt{E - E_C} dE}{1 + e^{(E - E_F)/kT}} \quad (2-9)$$

$$\eta = \frac{(E - E_C)}{kT} \quad (2-10-a)$$

$$\eta_C = \frac{(E_F - E_C)}{kT} \quad (2-10-b)$$

$$E_{\eta p} \rightarrow \infty \quad (2-10-c)$$

وبالتالي نحصل على :

$$n = \frac{m_n^* \sqrt{2 m_n^*} (kT)^{\frac{3}{2}}}{\pi^2 \hbar^3} \int_0^{\infty} \frac{\eta^{\frac{1}{2}} d\eta}{1 + e^{(\eta - \eta_C)/kT}} \quad (2-11)$$

التبسيط لحد التكامل العلوى من المعادلة (2-10-c) لا يغير فى النتيجة؛ لأننا نعلم أن الدالة تحت التكامل ستؤول للصفر بعد مضاعفات قليلة من kT .

وبالتالى فلأن من المؤكد أن تغيير حد التكامل العلوى إلى ما لا نهاية لن يؤثر فى قيمة التكامل. [جرب أن تكامل e^{-x} من صفر إلى 100 ثم من صفر إلى ما لا نهاية لتأكد مما نقول]. بالمثل فى التكامل p يمكن أن نعوض $E_{\text{Bottom}} \rightarrow -\infty$ دون تغيير فى قيمة التكامل.

ما زال إجراء التكامل (2-11) مستعصيا ولا توجد له صورة متهية closed form حتى بعد التبسيط (2-10-c). التكامل نفسه سنجده فى الواقع فى مراجع الجداول الرياضية (أو يحسب عدديا بالحاسب). إذا عرفنا :

$$F_{\frac{1}{2}}(\eta_c) \equiv \int_0^{\infty} \frac{\eta^{\frac{1}{2}} d\eta}{1 + e^{\eta - \eta_c}} \quad \text{تكامل فرمى - ديراك من الرتبة 1/2} \quad (2-12)$$

$$N_c \equiv 2 \left[\frac{m_n^* (kT)}{2\pi \hbar^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad \begin{array}{l} \text{الكثافة «الفعالة» لحالات} \\ \text{نطاق التوصيل} \end{array} \quad (2-13-a)$$

$$N_v \equiv 2 \left[\frac{m_p^* (kT)}{2\pi \hbar^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad \begin{array}{l} \text{الكثافة «الفعالة» لحالات} \\ \text{نطاق التكافؤ} \end{array} \quad (2-13-b)$$

نحصل على :

$$n = N_c \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{\frac{1}{2}}(\eta_c) \quad (2-14-a)$$

وبالمثل :

$$p = N_v \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{\frac{1}{2}}(\eta_c) \quad (2-14-b)$$

$$\eta_v \equiv (E_v - E_F) / kT \quad \text{حيث :}$$

المعادلات (2-14) هي نتائج عامة جدا وصالحة لآى موضع نتصوره لمستوى فرمى E_F . الثابتان N_c و N_v يمكن حسابهما من :

$$N_{c,v} = \left(2.510 \times 10^{19} / \text{cm}^3 \right) \left(\frac{m_{n,p}^*}{m_0} \right)^{\frac{3}{2}} \quad \begin{array}{l} \text{عند} \\ T = 300 \text{ K} \end{array}$$

ويمكن الحصول على قيم تكاملات فرمى من الجداول أو المنحنيات أو بالحساب العددي باستخدام الحاسب. لكن هذه العلاقة ذات الصيغة العامة تبقى مركبة وغير مناسبة للاستخدام فى التحليلات الروتينية. من حسن الحظ توجد صيغ نهائية مبسطة تغطى السواد الأعظم من المسائل اليومية. لكى نكون محددين، إذا وضعنا هذا القيد على مستوى فرمى: $E_F \leq E_C - 3kT$ فإن الدالة $1/[1+\exp(\eta-\eta_C)]$ تتحول إلى $\exp[-(\eta-\eta_C)]$ لكل قيم $E \leq E_C$ (أى لكل $\eta > 0$)، وبالتالي :

$$F_{\frac{1}{2}}(\eta_C) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} e^{(E_F - E_C)/kT} \quad (2-15-a)$$

وبالتالى إذا كان $E_V + 3kT < E_F < E_C - 3kT$ فإن :

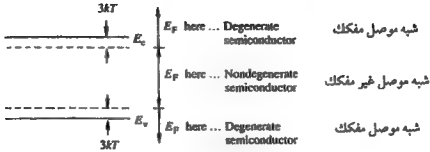
$$F_{\frac{1}{2}}(\eta_V) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} e^{(E_V - E_F)/kT} \quad (2-15-b)$$

ويستج عن ذلك أنه إذا كان $E_V + 3kT < E_F < E_C - 3kT$ إذن :

$$n = N_C e^{(E_F - E_C)/kT} \quad (2-16-a)$$

$$p = N_V e^{(E_V - E_F)/kT} \quad (2-16-b)$$

التبسيط الرياضى المؤدى للمعادلتين (2-16) مكافئ لتقريب معاملى الإشغال $f(E)$ و $1-f(E)$ بدوال قوى بسيطة، وهو تقريب رأينا سابقاً أنه يتحقق بشرط أن يكون E_F داخل فجوة النطاق ويبعد عن الحافتين E_V ، E_C بطاقة لا تقل عن $3kT$ بدلاً من إعادة كتابة الشرط $E_V + 3kT \leq E_F \leq E_C - 3kT$ فى كل مرة فلإننا ببساطة نلقب شبه الموصل الذى يحقق هذا الشرط بشبه الموصل غير المفكك nondegenerate (من يريد معرفة أصل هذه التسمية عليه بالرجوع إلى كتاب فى ميكانيكا الكم). أما إذا اقترب E_F من إحدى الحافتين بأقل من $3kT$ ، أو دخل إلى أحد النطاقين فإن شبه الموصل المعنى يسمى بالمفكك degenerate (التفكك فى ميكانيكا الكم يعنى وجود أكثر من حالة كمية لها نفس قيمة الطاقة). هذان المصطلحان الهامان موضحان تصويرياً فى الشكل (٢-١٩).



شكل (٢-١٩) تعريف أشباه الموصلات المفككة وغير المفككة

٢-٥-٢ تعبيرات بديلة لقيم n , p (Alternative Expressions for n and p)

بالرغم من أن الصيغة المعطاة بالمعادلة (2-16) تعتبر منتهية، إلا أنها ليست في أبسط صورة ممكنة. وغالبا ما نستعمل بدلا منها صورة أبسط.

يمكن الحصول على الصيغة البديلة إذا ما تذكرنا أن E_i - مستوى فرمى لشبه الموصل الذاتي - يقع قريبا من منتصف فجوة النطاق وأن المعادلة (2-16) تؤكد أنها تنطبق على شبه الموصل الذاتي أى أن $n = p = n_i$ ، وكذلك $E_F = E_i$ ، وبالتالي :

$$n_i = N_C e^{(E_i - E_C) / kT} \quad (2-17-a)$$

$$p_i = N_V e^{(E_V - E_i) / kT} \quad (2-17-b)$$

ينقل N_V ، N_C إلى الطرف الأيسر من المعادلة (2-17).

نحصل على :

$$N_C = n_i e^{(E_C - E_i) / kT} \quad (2-18-a)$$

$$N_V = n_i e^{(E_i - E_V) / kT} \quad (2-18-b)$$

التعويض من المعادلة (18) في المعادلة (16) يعطى :

$$\boxed{n = n_i e^{(E_F - E_i) / kT}} \quad (2-19-a)$$

$$\boxed{p = n_i e^{(E_i - E_F) / kT}} \quad (2-19-b)$$

المعادلة (2-19) ومثيلتها المعادلة (2-16) صحيحتان لأي شبه موصل غير مفكك ونحت ظروف الاتزان. اختصرت الثوابت في المعادلة (2-16) من ثابتين (N_V, N_C) لثابت واحد في المعادلة (2-19) : (n_i)، ومستويات الطاقة من ثلاث في المعادلة (2-16) إلى اثنين فقط في المعادلة (2-19). وبسبب طبيعتهما المتماثلة نجد أن استدعاء زوج المعادلات (2-19) البديلة من الذاكرة أسهل؛ لأنها تتطلب فقط تبديل E_F مع E_i عندما نذهب من المعادلة n - إلى المعادلة p -.

٢-٥-٣ n_i وحاصل ضرب np (the np Product and n_i)

من المعادلة (2-19) يمكن استنتاج أن التركيز الذاتي للحاملات n_i يتجلى بشكل لافت في حسابات تركيزات الحاملات. ويقودنا الاستمرار في تأسيس علاقات متعلقة بتركيزات الحاملات إلى اعتبارات تختص بالذات بالتركيز الذاتي n_i .

أولاً : إذا أجرينا عملية ضرب على طرفي المعادلتين (2-17-a) و (2-17-b) نحصل على :

$$n_i^2 = N_C N_V e^{(E_C - E_V)/kT} = N_C N_V e^{-E_G/2kT} \quad (2-20)$$

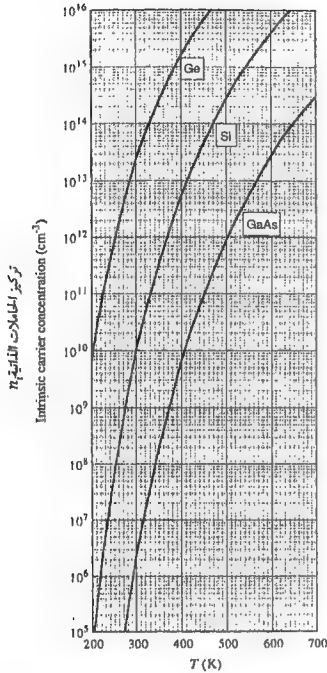
أي أن :

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{-E_G/4kT} \quad (2-21)$$

تعبّر المعادلة (2-21) عن n_i كدالة في كميات معروفة، وبالتالي يمكن استخدامها لحساب n_i كدالة في درجة الحرارة. أوردنا من قبل قيماً عددية للتركيزات الذاتية للحاملات في السيليكون والجرمانيوم عند درجة حرارة الغرفة، يعرض الشكل (٢-٢٠) أفضل المنحنيات المتاحة لتغيير n_i مع درجة الحرارة في السيليكون، الجرمانيوم، وورنيخيد الجاليوم.

علاقة ثانية غاية في الأهمية خاصة بالتركيز n_i نحىء من ضرب طرفي المعادلتين (2-19-a)، (2-19-b)، أى :

$$np = n_i^2 \quad (2-22)$$



Si	
$T(^{\circ}\text{C})$	$n_i(\text{cm}^{-3})$
0	8.86×10^8
5	1.44×10^9
10	2.30×10^9
15	3.62×10^9
20	5.62×10^9
25	8.60×10^9
30	1.30×10^{10}
35	1.93×10^{10}
40	2.85×10^{10}
45	4.15×10^{10}
50	5.97×10^{10}
300 K	1.00×10^{10}

GaAs	
$T(^{\circ}\text{C})$	$n_i(\text{cm}^{-3})$
0	1.02×10^5
5	1.89×10^5
10	3.45×10^5
15	6.15×10^5
20	1.08×10^6
25	1.85×10^6
30	3.13×10^6
35	5.20×10^6
40	8.51×10^6
45	1.37×10^7
50	2.18×10^7
300 K	2.25×10^6

شكل (٢٠-٢) تركيز الحاملات الذاتية n_i لـ Si ، Ge و $GaAs$ كدالة في درجة الحرارة

بالرغم من أن العلاقة (2-22) تبدو بسيطة لكنها غالباً ما تثبت أنها مفيدة جداً في الحسابات العملية إذا عرفنا أحد التركيزين n أو p فيمكن من (2-22) حساب الآخر شرط أن شه الموصل في ظروف الاتزان وغير مفكك.

تحديد n_i بدقة:

بالتعويض من تعاريف N_V و N_C (معادلة (2-13)) في المعادلة (2-21) وبعد التعويض عن الثوابت بقيمتها العددية يحصل المرء على :

$$n_i = \left(2.510 \times 10^9 \right) \left(\frac{m_n^* m_p^*}{m_0^*} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{T}{300} \right)^{\frac{2}{3}} e^{-E_G/KT}$$

في الحقيقة ، m_p^* ، m_n^* ، و E_G كلها تعتمد على درجة الحرارة، ولهذا يجب أخذ هذه التغيرات في الحسبان. وقد وجد سيرول وجرين^(١) : أنه في السيليكون وعند درجة حرارة الغرفة، $T = 300 \text{ K}$ ، تكون: $n_i = (1.00 \pm 0.03) \times 10^{10} / \text{cm}^3$.

٢-٥-٤ علاقة تعادل الشحنة Charge Neutrality Relationship

تخلو العلاقات التي أسسناها إلى الآن من أى ذكر صريح لتركيزات المشييات. وتربط بصفة عامة بين تركيزات الحاملات وتركيزات المشييات علاقة تعادل الشحنات.

لكى نؤسس علاقة تعادل الشحنات سنعتبر أن شبه الموصل مشاب بانتظام، أى أن عدد الذرات المشيية لكل cm^3 هو نفسه فى كل مكان. وإذا فحصنا بطريقة منتظمة مناطق صغيرة داخل شبه الموصل (أى بعيدة عن السطح) وبافتراض أن الظروف السائدة هى ظروف الاتزان فلا بد وأن نجد أن كل منطقة على حدة متعادلة الشحنة أى لا تحمل أى شحنة إجمالية. إذا لم تكن الحالة هكذا، فلا بد وأن ينشأ مجال كهربي داخل شبه الموصل. ويسبب هذا للمجال سريانا للحاملات أى تيارا مما يتناقض وتعريف حالة الاتزان التى يفترض وجودها. لكن توجد بالفعل كيانات مشحونة داخل شبه الموصل: الإلكترونات، والشغرات، والواهبات المتأينة (التي تصبح موجبة الشحنة بعد منع إلكترونها الخامس) وأخيرا المتقبلات المتأينة والمشحونة بشحنة سالبة. كل هذه الكيانات تتعايش معا جنباً إلى جنب داخل شبه الموصل. فى المادة المشابة بانتظام يتطلب تعادل الشحنة فى كل مكان، أى أن الشحنة لكل cm^3 تساوى صفراً. ويعنى ذلك أن :

$$qp - qn + qN_D^+ - qN_A^- = 0 \quad (2-23)$$

أى أن :

$$p - n + N_D^+ - N_A^- = 0 \quad (2-24)$$

(١) جورنال الفيزياء التطبيقية مجلد 70 صفحة 846 يولي 1991.

حيث تمثل .

N_D^+ عدد المانحات المتأينة الموجبة السالبة الشحنة لكل cm^3 .

N_A عدد المتقبلات المتأينة السالبة الشحنة لكل cm^3 .

وكما نوقش من قبل فإنه عند درجة حرارة الغرفة توجد طاقة حرارية كافية لكى تؤين كل مواقع المانحات والمتقبلات ذات مستويات الطاقة الضحلة (أى القريبة من E_C و E_V).

ونعرف هنا :

N_D هو العدد الكلى للمانحات لكل cm^3 .

N_A هو العدد الكلى للمتقبلات لكل cm^3 .

فإذا جعلنا :

$$\begin{aligned} N_D^+ &= N_D \\ N_A^- &= N_A \end{aligned}$$

درجة حرارة الغرفة
تأين كلى

فلإننا نحصل على :

$$p - n + N_D - N_A \approx 0 \quad (2-25) \quad \text{تأين كلى}$$

المعادلة (2-25) هى الشكل القياسى لعلاقة تعادل الشحنة .

٢-٥-٥ حسابات تركيزات الحاملات Carrier Concentration Calculation

أخيرا وصلنا لموضع يمكننا من حساب تركيزات الحاملات فى أشباه الموصلات المنتظمة الإشابة تحت ظروف الاتزان، فى هذه الحسابات نفترض بالتحديد أن شبه الموصل غير مفكك (لكى نستخدم العلاقة $np = n_i^2$)، وأن كل ذرات الإشابة تامة التأين . يجب أن نعتبر أن قيمة n_i معروفة (سواء من منحنى أو جدول أو كنتيجة محسوبة مسبقا). وفى جميع الأحوال سنفترض أنها معطاة . وكذلك N_D ، N_A الموجودتان فى علاقة معادلة الشحنة، يمكن التحكم فيهما وتحديدتهما تجريبيا ويجب أن نعتبرهما معروفين مسبقا . الكميتان المتبقيتان هما n ، p . وتحت الشروط المذكورة أعلاه (الاتزان وعدم التفكك والتأين التام للذرات المشيئة) نستطيع تحديد n ، p من معادلتى: تعادل الشحنة وعلاقة $np = n_i^2$.

ونبدأ بهذه العلاقة الأخيرة ونكتب :

$$p = \frac{n_i^2}{n} \quad (2-26)$$

حذف p من المعادلتين (2-25) و (2-26) يعطى :

$$\frac{n_i^2}{n} - n + N_D - N_A = 0 \quad (2-27)$$

$$n^2 - n (N_D - N_A) - n_i^2 = 0 \quad (2-28)$$

ويؤدى حل معادلة الدرجة الثانية فى n إلى :

$$n = \frac{N_D - N_A}{2} + \left[\left(\frac{N_D - N_A}{2} \right)^2 + n_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-29-a)$$

وأيضاً :

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{N_A - N_D}{2} + \left[\left(\frac{N_A - N_D}{2} \right)^2 + n_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-29-b)$$

طبعا احتفظنا فقط بالإشارة الموجبة فى المعادلات (2-29)؛ لأن الإشارة السالبة (فى قانون معادلة الدرجة الثانية) ستعطى تركيزاً سالباً وهى نتيجة غير مقبولة.

حلول المعادلتين (2-29) هى حلول الحالة العامة.

فى أغلب الحسابات العملية يمكن تبسيط هاتين المعادلتين قبل التعويض بالأرقام عن قيم n_i ، N_A ، N_D الحالات الخاصة ذات الاهتمام المحدد هى :

- ١- شبه موصل ذاتى $N_D = 0$ ، $N_A = 0$ ، فإن $n = p = n_i$ كما هو متوقع.
- ٢- شبه موصل مشاب : $N_D \gg N_A$ ، $N_D \gg n_i$ (أو $N_A \gg N_D$ ، $N_A \gg n_i$)، وهذه حالة مهمة عملياً.

الشواوب العارضة (أى التى لم توضع عن قصد) قليلة للغاية بحيث تودى الإضافة الروتينية المحكومة للمشييات إلى أن $N_D \gg N_A$ (أو $N_A \gg N_D$). بالإضافة إلى ذلك فإن n_i فى السيليكون عند درجة حرارة الغرفة حوالى $10^{10} / \text{cm}^3$ ، بينما أى إشابة متعمدة تجعل N_D (أو N_A) لا تقل عن $10^{14} / \text{cm}^3$ ، وهذه الحالة هى الغالبة عملياً.

إذا كان $n_i \gg N_D - N_A \approx N_D$ ، فإن الجذر التربيعي في المعادلة (2-29-a) يختزل إلى $N_D/2$ ، وبالتالي :

$$\boxed{\begin{aligned} n &\approx N_D \\ p &\approx n_i^2 / N_D \end{aligned}} \quad \begin{aligned} N_D \gg N_A, N_D \gg n_i & \quad (2-30-a) \\ \text{عدم تفكك ناين تام} & \quad (2-30-b) \end{aligned}$$

$$\boxed{\begin{aligned} p &\approx N_A \\ n &\approx n_i^2 / N_A \end{aligned}} \quad \begin{aligned} N_A \gg N_D, N_A \gg n_i & \quad (2-31-a) \\ \text{عدم تفكك ناين تام} & \quad (2-32-b) \end{aligned}$$

وكمثال عددي نفترض أن عينة سيليكون في درجة حرارة الغرفة قد أشبعت بتركيز $N_D = 10^{15} / \text{cm}^3$ يمكن بسرعة من المعادلة (30) معرفة أن :
 $n \approx 10^{15} / \text{cm}^3$, $p = 10^5 / \text{cm}^3$

٣- شبه موصل مشاب حيث $n_i \gg |N_D - N_A|$ ، الزيادة المطردة لدرجة الحرارة المحيطة بشبه الموصل تسبب زيادة في التركيز الذاتي n_i (انظر الشكل ٢-٢٠). عند درجة الحرارة الكافية الارتفاع فإن n_i في النهاية مستعدى تركيز المشييات. إذا كان $|N_D - N_A| \gg n_i$ فإن الجذر التربيعي في المعادلة (2-29) سيؤول إلى n_i ، وبالتالي $n \approx p \approx n_i$. بكلمات أخرى : تصبح جميع أشباه الموصلات أشباه موصلات ذاتية عندما تتعدى درجة الحرارة لقيمة كافية بحيث تكون عندها : $|N_D - N_A| \gg n_i$.

٤- في أشباه الموصلات المعوضة كما هو واضح من المعادلة (2-29)، كلا من n و p غيلان لتحديد عمل الأخرى. وفي الواقع يمكن إنتاج شبه موصل شبه بالذاتي إذا جعلنا $N_D - N_A = 0$.

في بعض المواد مثل Ga As نجد أن N_A قد تكون مقاربة لقيمة N_D لبعض البلورات. عندما تتقارب قيم N_D, N_A (والتي لا تساوى صفراً) فإن المادة يقال لها معوضة compensated. وفي هذه الحالة لا يجوز التبسيط ويجب التعويض بقيم N_A و N_D كما هي .

مثال ٢-٤ :

عينة سيليكون مشابهة بتركيز 10^{14} ذرة بورون لكل cm^3 .

أ - ما هي تركيزات الحاملات عند $T = 300 \text{ K}$.

ب- ما هي تركيزات الحاملات عند $T = 470 \text{ K}$.

الحل :

أ - البورون يقوم بدور المتقبلة في السيليكون (انظر الجدول ٢-٢) إذن :

$N_A = 10^{14} / \text{cm}^3$ عند $T = 300 \text{ K}$ ، و $n_i = 1.00 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ ، وبالتالي $N_A \gg n_i$ ، وبما أن رأس السؤال لم يذكر أى إشابة أخرى. نستنتج أن $N_A \gg N_D$ ، إذن من المعادلة (2-31) نحسب تركيزات الحاملات $n = n_i^2 / N_A = 10^6 / \text{cm}^3$ ، $p = N_A = 10^{14} / \text{cm}^3$.

ب- نستخرج من الشكل (٢-٢) القيمة $n_i = 10^{14} / \text{cm}^3$ عند $T = 470 \text{ K}$. بما أن n_i مقاربة فى القيمة لـ N_A إذن نستخدم المعادلة (2-29) دون تبسيط، أى :

$$p = \frac{N_A}{2} + \left[\left(\frac{N_A}{2} \right)^2 + n_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 1.62 \times 10^{14} / \text{cm}^3$$

$$n = \frac{n_i^2}{p} = 6.18 \times 10^{13} / \text{cm}^3$$

٢-٥-٦ تحديد E_F (Determination of E_F)

تحديد مستوى فرمى على مخطط نطاق الطاقة غالباً ما يكون مثير اهتمام، مثلاً عندما ناقشنا شبه الموصل الذاتى أشرنا إلى أن موضع E_i هو فى مكان ما قرب منتصف فجوة النطاق. سيكون من المفيد معرفة موضع E_i فى فجوة النطاق بدقة. وأكثر من ذلك لقد طورنا صيغةا لحساب n و p مناسبة لأشباه الموصلات غير المفككة. طبعاً يكون شبه موصل مفكك أو غير مفكك يعتمد على موضع E_F .

قبل الولوج لآليات إيجاد مستوى فرمى فى حالات مختارة، سيكون من المفيد أن نذكر ملاحظة عامة، ونقص بذلك أن المعادلات (2-19) أو (2-16) أو حتى المعادلات العامة (2-14) تنشئ تناظراً واحداً لواحد بين طاقة فرمى وتركيزات الحاملات، بالتالى إذا حسبنا أى واحد من المتغيرات الثلاثة n ، p ، أو E_F فإننا دائماً سنتمكن من تحديد المتغيرين الباقين فى ظروف الاتزان.

١- التحديد الحقيقي لموضع E_F في المادة الذاتية :

$$n = p \quad (2-32)$$

بالتعويض عن n ، p في المعادلة السابقة من المعادلتين (2-16) بعد أن نضع $E_F = E_i$ ، نصل إلى :

$$N_C e^{(E_i - E_C)/kT} = N_V e^{(E_V - E_i)/kT} \quad (2-33)$$

ومنها نحصل على :

$$E_i = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{N_V}{N_C} \right) \quad (2-34)$$

لكن :

$$\frac{N_V}{N_C} = \left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2-35)$$

ونتيجة لذلك تصبح :

$$E_i = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right) \quad (2-36)$$

طبقاً للمعادلة (2-36)، فإن E_i يقع بالضبط عند منتصف فجوة الطاقة إذا كانت $m_p^* = m_n^*$ أو عند $T = 0 \text{ K}$. وفي الحالة العملية للسيليكون وعند درجة حرارة الغرفة، يعطى الجدول (١-٢) القيمة التالية m_p^*/m_n^* ، وبالتالي فإن :

$$\left(\frac{3}{4} \right) kT \ln (m_p^*/m_n^*) = -0.0073 \text{ eV}$$

إذن E_i يقع تحت منتصف فجوة النطاق بحوالى 0.0073 eV .

وبرغم أن هذه الحقيقة قد تكون هامة في بعض المسائل، لكن عادة ما يتم تجاهلها عند رسم مخططات نطاق الطاقة أو ما شابه ذلك.

٢- أشباه الموصلات المشابة (غير مفككة) والمشيبيات تامة التأين

تمكنا من المعادلتان (2-19) من التحديد العام لمستوى فرمي في أشباه الموصلات المشابة بالمناححات أو التقبلات بفرض أنها غير مفككة وتحت الاتزان، وعند درجة الحرارة التي عندها كل المشيبيات متأينة. بالتحديد عند حل المعادلتين (2-19) للحصول على $E_F - E_i$ نصل إلى :

$$E_F - E_i = kT \ln \left(\frac{n}{n_i} \right) = -kT \ln \left(\frac{p}{n_i} \right) \quad (2-37)$$

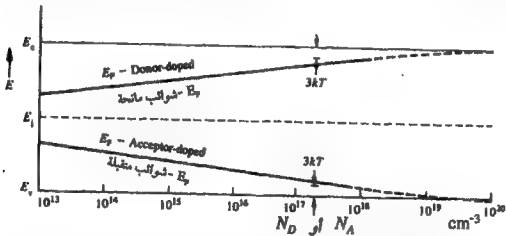
بالتعويض عن قيم n أو p في المعادلة (2-37) يمكن الحصول على موضع E_F . ويمكن الحصول على n أو p من المعادلة المناسبة سواء (2-29)، (2-30)، أو (2-31). فمثلا من المعادلة (2-30-a) و (2-31-a) نجد أن $n \approx N_D$ في حالة شبه الموصل المشاب بالمناحبات وأن $p \approx N_D$ في حالة شبه الموصل المشاب بالمتقبلات، وذلك عند درجة حرارة الغرفة.

بالتعويض بهذه القيم في المعادلة (2-37) نحصل على :

$$E_F - E_i = kT \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right) \dots N_D \gg N_A, N_D \gg n_i \quad (2-38-a)$$

$$E_i - E_F = kT \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) \dots N_A \gg N_D, N_A \gg n_i \quad (2-38-b)$$

يتضح من المعادلتين (2-38) أن مستوى فرمى يتحرك بانتظام إلى أعلى فوق E_i مع زيادة تركيز المشيبات المانحة ويتحرك بانتظام إلى أسفل تحت E_i مع زيادة المشيبات المتقبلة. يبين الشكل (٢١-٢) موضع مستوى فرمى بدقة للسيليكون كدالة في تركيز الإشابة عند درجة حرارة الغرفة، ويدعم هذا الشكل جيدا ما سبق وأشرنا إليه بالعبارة



شكل (٢١-٢) موضع مستوى فرمى في السيليكون عند 300 K كدالة في تركيز الإشابة
الحطمان المصمتان رسما طبقا للمعادلة (2-28-a) للمادة المشابة بمناحبات
وللمعادلة (2-28-b) للمادة المشابة بمتقبلات (هنا $kT=0.0259$ eV و $n_i=10^{10}/\text{cm}^3$)
الجزء المقطوع يخص شبه موصل مفكك، وبالتالي لا ينطبق للمعادلتين السابقتين

السابقة. لاحظ أيضا أنه عند أى درجة حرارة معينة ولأى مادة شبه موصلة معطاة هناك حد أقصى لتراكيزات المانحات أو المتقبلات والذي بعده تصبح المادة مفككة. فى السيليكون عند درجة حرارة الغرفة تكون التراكيزات غير المفككة القصوى هى

$N_A \approx 9.1 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ و $N_D \approx 1.6 \times 10^{18} / \text{cm}^3$. وجددير بالذكر أن تراكيزات الإشابة الكبيرة بالسيليكون والمطلوبة لإحداث التفكك قد جعلت كلا من المصطلحين «الإشابة العالية» (أو مادة n^+ أو p^+) أو «مفككة» (كوصف لمادة شبه الموصل) متكافئتين ويستخدم أى منهما مكان الآخر.

وأخيرا قد ينشأ سؤال عما هى الطريقة التى يجب استخدامها لحساب E_F عندما لا يكون المرء متأكدا من كنه المادة مفككة أم غير مفككة؟

ما لم تكن متأكدين من أن المادة مفككة مستفترض دائما أنها غير مفككة ونطبق علاقات عدم التفكك المناسبة. فإذا اتضح أن E_F واقعة فى المنطقة المفككة (أى داخل أحد النطاقين أو قريبة من حد النطاق بأقل من $3kT$) وجب إعادة حساب E_F باستخدام طرق معقدة، خاصة بالمواد المفككة.

مثال ٢-٥ :

لكل من الحالات المعينة بالمثال ٢-٤ قم بتحديد موضع E_F ، ثم احسب $E_F - E_i$ وارسم بعناية مخطط نطاق طاقة بالأبعاد الصحيحة لعينة السيليكون.

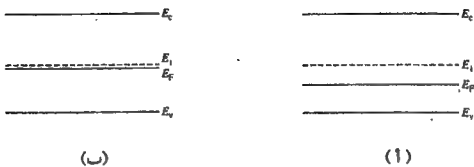
لاحظ أن للسيليكون $E_G = 1.08 \text{ eV}$ ، و $m_p^* / m_n^* = 0.71$ ، وذلك عند درجة الحرارة $T = 470 \text{ K}$.

الحل :

فى الجزء (١) بالمثال (٢-٤) $N_A = 10^{14} / \text{cm}^3$ لعينة سيليكون عند 300 K . باستخدام المعادلة (2-26) يتضح أن E_i يقع تحت منتصف الفجوة بمقدار 0.0073 eV (سبق أن ذكرنا ذلك أيضا عقب المعادلة (2-36)، ثم نطبق المعادلة (2-38b) ونحصل على :

$$\begin{aligned} E_i - E_F &= kT \ln (N_A / n_p) \\ &= 0.0259 \ln (10^{14} / 10^{10}) = 0.239 \text{ eV} \end{aligned}$$

مخطط نطاق الطاقة الذى يوضح موضع E_F مرسوم بالجزء (١) بالشكل الآتى:



مثال (٢-٦)

ب- فى الجزء (ب) بالمثال (٢-٤) تم تسخين عينة لسليكون إلى 470 K، وباستخدام $m_p^*/m_n^* = 0.71$ و $kT = 0.0405 \text{ eV}$ عند تسخين $T = 470 \text{ K}$ ، أى (3/4) $kT \ln(m_p^*/m_n^*) = -0.0104 \text{ eV}$ نستنتج أن تقع عند E_i 0.0104 eV تحت منتصف فجوة النطاق. بما أن التركيز N_A مقارب للتركيز الذاتى n_i عند 470 K فيجب استخدام المعادلة (2-37) لتحديد E_F . وبالتحديد فإن $n_i = 10^{14} / \text{cm}^3$ ، وكذلك $p = 1.62 \times 10^{14} / \text{cm}^3$.

$$\begin{aligned}
 E_i - E_F &= kT \ln(p/n_i) \\
 &= 0.04505 \ln(1.62 \times 10^{14} / 10^{14}) \\
 &= 0.0195 \text{ eV}
 \end{aligned}$$

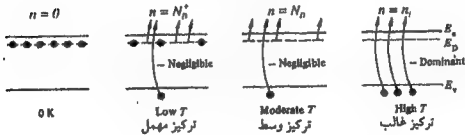
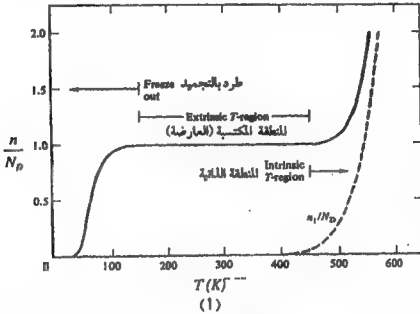
هنا E_F تزاوح قليلا عن E_i كما هو مبين بالجزء (ب).

٢-٥-٢ تغير تركيز الحاملات مع درجة الحرارة

Change of Carrier Concentration with Temperature

قدما فى أجزاء متفرقة من هذا الفصل حقائق منفصلة عن اعتماد تركيزات الحاملات على درجة الحرارة. على سبيل المثال عند مناقشة فعاليات المشييات فى الفقرة (٣-٢) ذكرنا أن المشييات تتأين عند ارتفاع درجة الحرارة من $T = 0 \text{ K}$ إلى درجة حرارة الغرفة. وفى فقرات لاحقة كان هناك شكل يحوى منحى التركيز الذاتى مع درجة الحرارة (الشكل ٢-٢٠) وحسابات تشير إلى أن كل أشباه الموصلات تصبح ذاتية ($n_i \rightarrow n, m \rightarrow n_i, p \rightarrow n_i$) عند درجات حرارة عالية كافية. فى الفقرة الفرعية الحالية التى نختم بها مناقشة تركيزات الحاملات، ستجتمع وترتب الحقائق المتعلقة بدرجة الحرارة لتعطى وصفا أرحب، وأكثر اكتمالا عن كيفية تغير تركيزات الحاملات مع درجة الحرارة.

يبين الشكل (٢-٢٢) منحنا نمطيا لتركيز الحاملات مع درجة الحرارة بافتراض عينة سيليكون مشابه بفسفور $N_D = 10^{15}/\text{cm}^3$. ويوضح الشكل بدقة الملامح العامة لتغير تركيزات الحاملات مع درجة الحرارة. يفحص شكل (٢-٢٢) نجد أن n تبقى تقريبا ثابتة عند القيمة N_D على مدى حرارى واسع يمتد من 150 K وحتى 450 K لعينة السيليكون المعطاة. المنطقة التي عندها $n = N_D$ وتسمى «منطقة درجة الحرارة المكتسبة» extrinsic temperature region تشكل منطقة العمل لمعظم نباط الحالة الجامدة. تحت درجة حرارة 100 K تقريبا تقع منطقة الطرد بالتجميد freeze-out، والتي عندها تهبط قيمة n كثيرا تحت N_D عندما $T \rightarrow 0$ K. وفي الناحية المقابلة من تدرج درجة الحرارة تقع منطقة الحرارة الذاتية Intrinsic temperature region ($T > 450$ K) للسيليكون، حيث تزداد n فوق القيمة N_D ولتتقارب مع n_i كلما رادت درجة الحرارة.



شكل (٢-٢٢)

- ١ - اعتماد نمطى على درجة الحرارة لتركيز الحاملات الأخرية فى شبه موصل مشاب، أنشئ المنحنى بافتراض إشابة بالفسفور $N_D = 10^{15}/\text{cm}^3$ ، لعينة Si.
- أضيف المنحنى المتقطع الذى يمثل اعتماد n_i/N_D مع درجة الحرارة لغرض المقارنة
- ب- تفسر كيفية لاعتدال التركيز على درجة الحرارة المبين بالجزء (١)

لكي نفسر كيفية التغير في تركيز الحاملات مع درجة الحرارة، والذي وصفناه
 لتو، من المهم أن نتذكر أن تركيز الحاملات عند الاتزان داخل المادة يخضع لأيتين
 منفصلتين. فكل من الإلكترونات الممنوحة من الذرات المانحة لنطاق التوصيل مع
 الإلكترونات التكافؤ المستتارة عبر فجوة النطاق إلى نطاق التوصيل (أي روابط سيليكون-
 سيليكون مكسورة)، كلا النوعين يضيفان إلى تركيز الإلكترونات (الحاملات الأكثرية في
 المادة المشابة بالمانحات). عندما تتحول $T \rightarrow 0\text{ K}$ لا تتوفر طاقة حرارة kT كافية لإطلاق
 الإلكترونات الخامسة المربوطة بوهن لذراتها المانحة وطبعاً ستكون هذه الطاقة الحرارية
 الضئيلة غير كافية على الإطلاق لاستثارة إلكترونات عبر فجوة النطاق. إذن تكون
 $n = 0$ عندما $T = 0$ ، كما هو مبين في الناحية اليسرى من الشكل (٢-٢٢ب). الزيادة
 الطفيفة لدرجة الحرارة فوق الصفر المطلق ستؤدي إلى «كسر الجمود» أو لتحرير بعض
 الإلكترونات الخامسة المرتبطة بالمواضع المانحة. وستظل الاستثارة من نطاق لنطاق غير
 واردة بالمرء، وبالتالي ففي منطقة حرارة الطرد بالتجميد يكون عدد الإلكترونات المتاحة
 هو عدد المانحات المشابة $n = N_D^+$. بالاستمرار في رفع درجة حرارة النظام سنصل
 للمنطقة التي عندها في الغالب تتحرر كل الإلكترونات الخامسة الواهنة الارتباط بمواضع
 المتح مما يجعل n تقارب إلى N_D وندخل بذلك للمنطقة الحرارية المكتسبة. في نهاية
 المطاف طبعاً سيتساوى عمل الإلكترونات المستتارة عبر فجوة النطاق مع عدد الإلكترونات
 المشتقة من المانحة (انظر الناحية اليمنى للشكل ٢-٢٢ب) ثم يزيد عنه، وفي النهاية
 ستفوق الإلكترونات القادمة من المانحات في طوفان الإلكترونات الناتجة عن تكسر المزيد
 من روابط السيليكون-سيليكون (أي المستتارة عبر E_G).

يجب أن نشير -كملاحظة عملية- أنه كلما كبرت فجوة النطاق رادت الطاقة
 المطلوبة لاستثارة الإلكترونات من نطاق التكافؤ لنطاق التوصيل، وبالتالي ترتفع قيمة
 درجة الحرارة التي تبدأ عندها المنطقة اللاتية الحرارية. وبما أن درجة حرارة بدء المنطقة
 اللاتية تناظر الحد الأقصى للمدى الحراري للتشغيل العادي لمعظم نواقل الحالة الجامدة،
 بالتالي فإن النواقل المبنية على Ga As سيكونها العمل عند درجات حرارة قصوى أعلى
 من نظيراتها المبنية على السيليكون والمشابة بنفس مستوى الإشابة، وهذه الأخيرة ستعمل
 عند درجات حرارة قصوى أعلى من نظيراتها المبنية على الجيرمانيوم والتساوية معها في
 الإشابة، فمثلاً إذا افترضنا أن التركيز الحرج للإشابة هو $N_D = 10^{15} / \text{cm}^3$ ، وأن بداية
 المنطقة اللاتية الحرارية ستكون تقريباً عند درجة الحرارة التي عندها $n_i = N_D$ ، سنستنتج
 إذن من الشكل (٢-٢) أن درجات الحرارة القصوى هي 385 K، 450 K و 700 K
 للجيرمانيوم، والسيليكون وورنيديوم الجاليوم على الترتيب. وبالفعل فإن نواقل Ga As،
 وكذلك SiC (كريد السيليكون له $E_G > 2\text{ eV}$) يستمر تطويرها للاستخدام في البيئات
 المرتفعة الحرارة.

(٦-٢) ملخص وملاحظات ختامية

تحت العنوان العام «نمذجة الحاملات» قمنا بوصف، فحص، وتشخيص characterization الحاملات داخل شبه الموصل تحت ظروف «الشبهات» أو الاتزان. اشتملت الموضوعات الهامة التي تعرضنا لها في هذا الفصل على تقديم نموذجين «تصوير»: نموذج الروابط ونموذج نطاق الطاقة. في الواقع أن نموذج نطاق الطاقة ليس مجرد نموذج (إنها لغة إشارة متطورة توفر وسائل مختصرة للتواصل على المستوى غير اللفظي) بالنسبة للحاملات ذاتها سيكون القارئ الآن قد تم دفعه بنجاح نحو التفكير بالإلكترونات والشغرات «كجسيمات» كلاسيكية شبيهة بالكرات. وحيث شحنة الإلكترون هي $-q$ ، والشغرة $+q$ ، والكتلة الفعالة للإلكترون هي m_n^* ، وللشغرة m_p^* ، على الترتيب. ويجب على القارئ أن يعرف أن أعداد الحاملات لنفس المادة الذاتية كلها متساوية وصغيرة نسبيا، لكن يمكن زيادة تركيز الحاملات اختياريًا عن طريق إضافة ذرات شوائب خاصة (تسمى بالمشيبات) إلى شبه الموصل.

خلال معالجة مسألة تحديد تركيزات الحاملات في أشباه الموصلات المشابة، طورنا أو اشتقنا عددا من العلاقات الرياضية المفيدة. ونتمتع قائمة الموضوعات التي تستحق اهتماما خاصا لتشمل دوال كثافة الحالات (معادلتى 2-6)، دالة فرمى (معادلة 2-17)، العلاقات المتماثلة غير المفككة لكل من n و p (معادلتى 2-19)، حاصل ضرب np (معادلة 2-22)، علاقة تعادل الشحنة (معادلة 2-25)، وأخيرا التغيرات المبسطة لكل من n و p ، والتي تخص أشباه الموصلات النمطية عند درجة حرارة الغرفة (معادلتى 2-30) و (2-31).

جمعنا المعادلات السابقة الذكر مع بعض المعادلات الأخرى ووضعناها في الجدول (٤-٢). يجب أن يحلر القارئ من استخدام هذه المعادلات بدون تفكير وفهم؛ لأن مسائل أشباه الموصلات مفعمة بالاستثناءات، والحالات الخاصة والأوضاع غير المثالية، وأنه من الضروري على من يستخدم هذه العلاقات أن يعي الفرضيات التي استخدمت في اشتقاق هذه العلاقات وحدود صحتها في أى وكل التعبيرات المستعملة في التحليل والحسابات. بالإضافة لعلاقات الحاملات الكمية، على القارئ أن يطور «إحساسا» كيفيا بتوزيعات الحاملات في النطاقين المعنيين، ويتغير التركيز الذاتي مع درجة الحرارة، والتغير النمطي لتركيز الحاملات الاغلبية في شبه الموصل المشاب مع تغير درجة الحرارة. أخيرا، يجب أن نولى عناية خاصة بالمصطلحات الفنية الكثيرة والقيم الوسيطة parametric التي قدمت في هذا الفصل. المصطلحات أمثال شبه موصل مكتسب،

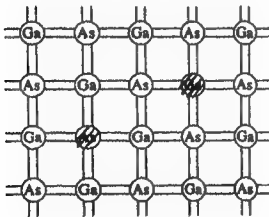
جدول (٢-٤) ملخص معادلات نموذج حاملات الشحنة الكهربائية

Table 2.4 Carrier Modeling Equation Summary.		علاقات تركيز الحاملات
Density of States and Fermi Function		
$g_c(E) = \frac{m_n^* \sqrt{2m_n^*(E - E_c)}}{\pi^2 \hbar^3}, \quad E \geq E_c$		$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/kT}}$
$g_v(E) = \frac{m_p^* \sqrt{2m_p^*(E_v - E)}}{\pi^2 \hbar^3}, \quad E \leq E_v$		
Carrier Concentration Relationships		
$n = N_C \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2}(\eta_c)$	$N_C = 2 \left[\frac{m_n^* kT}{2\pi \hbar^2} \right]^{3/2}$	$n = N_C e^{(E_F - E_c)/kT}$
$p = N_V \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2}(\eta_v)$	$N_V = 2 \left[\frac{m_p^* kT}{2\pi \hbar^2} \right]^{3/2}$	$p = N_V e^{(E_v - E_F)/kT}$
n_i وحاصل ضرب np ومعامل الشحنة		
$n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{-E_G/2kT}$	$np = n_i^2$	$p - n + N_D - N_A = 0$
علاقات حسابية لكل من n و p ومستوى فرمي		
$n = \frac{N_D - N_A}{2} + \left[\left(\frac{N_D - N_A}{2} \right)^2 + n_i^2 \right]^{1/2}$		$E_i = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right)$
$n \approx N_D \quad N_D \gg N_A, N_D \gg n_i$		$E_F - E_i = kT \ln(n/n_i) = -kT \ln(p/n_i)$
$p \approx n_i^2/N_D$		
$p \approx N_A \quad N_A \gg N_D, N_A \gg n_i$		$E_F - E_i = kT \ln(N_D/n_i) \quad N_D \gg N_A, N_D \gg n_i$
$n \approx n_i^2/N_A$		$E_i - E_F = kT \ln(N_A/n_i) \quad N_A \gg N_D, N_A \gg n_i$

مانحة، متقبلة، شبه موصل غير مفكك، مستوى فرمي وغيرها سيتم ذكرها مرارا عند مناقشة النقاط شبه الموصلة. بالمثل فإن معرفة القيم النمطية للوسيطات الهامة مثل $n_i = 10^{10} / \text{cm}^3$ للسيليكون عند $T = 300 \text{ K}$ ستكون مفيدة، سواء أجرينا حسابات عابرة أو حسابات دقيقة باستخدام الحاسب. كما أن هذه القيم تصلح كمقياس لمعرفة المقدار النسبي للكميات الجديدة التي قد نقابلها وهل هي كبيرة أم صغيرة نسبيا.

أسئلة على الفصل الثاني :

- ١- باستخدام نموذج الروابط لأشياء الموصلات وضح كيفية تصوير :
 - أ - ذرة غائبة، ب- إلكترون، ج- شفرة، د - مانحة، هـ- متقبلة.
- ٢- استخدم نموذج نطاق الطاقة لتصوير :
 - أ - إلكترون. ب- شفرة. ج- موضع مانحة. د- موضع متقبلة.
 - هـ- الطرد بالتجميد للشفرات للأغلبية عند موضع متقبلة عندما $T \rightarrow 0 K$.
 - و- الطرد بالتجميد بالإلكترونات للأغلبية عند موضع مانحة عندما $T \rightarrow 0 K$.
 - ز - توزيع الحاملات مع الطاقة لكل نطاق على حدة (الإلكترونات في نطاق التوصيل والشواغر في نطاق التكافؤ).
 - ح - شبه موصل ذاتي. ط - شبه موصل من النوع n .
 - ي- شبه موصل من النوع p . ك- شبه موصل غير مفكك.
 - ل - شبه موصل مفكك.
- ٣- نموذج الروابط لـ Ga As موضحة في الشكل (م ٢-٣).
 - أ - أعد رسم الشكل بعد إزالة اللترتين المظلتين (تلميح : إزالة ذرة Ga أو As يعني أيضا إزالة إلكترونات الترابط الخاصة بالذرة المنزوعة).
 - ب- أعد رسم الشكل بعد استبدال اللترتين المظلتين بلترتي Si.
 - ج- هل استبدال ذرات جاليوم بالسيليكون يؤدي إلى Ga As من النوع n أم p ، اشرح.
 - د - هل استبدال ذرات زرنيخ بلترات سيليكون سيؤدي إلى Ga As من النوع n أم p . اشرح.



الشكل (م ٢-٣)

هـ- ارسم مخطط نطاق الطاقة لـ Ga As عند إشابته بالسيليكون :

١- فى مواضع الجاليوم.

٢- فى مواضع الزرنيخ.

٤- اشتق تعبير للمعد الكلى للحالات المتاحة لكل cm^3 فى نطاق التوصيل فى مدى الطاقة E_C حتى $E_C + \gamma kT$ حيث γ ثابت.

٥- ١- عند درجة الحرارة $T > 0 \text{ K}$ ما هو احتمال أن يحتل إلكترون حالة طاقاتها E_F .

ب - إذا انطبق E_F على E_C ما احتمال إشغال الحالة $E = E_C + kT$.

ج- إذا كان احتمال أن الحالة $E_C + kT$ مشغولة يساوى احتمال أنها غير مشغولة، أين موضع مستوى فرمى؟

٦- اثبت أن توزيع الإلكترونات فى نطاق التوصيل يكون أكبر ما يمكن عند الطاقة $E_C + kT/2$ بفرض أن شبه الموصل غير مفكك.

٧- ابدأ من المعادلة (2-8-b)، واثبت صحة المعادلتين : (2-14-b)، و(2-16-b)، اكتب خطوات الإثبات كلها.

٨- فى شبه موصل افتراضى، كثافة الحالات هي :

$$g_C(E) = \text{const} = N_C / kT, E \geq E_C$$

١ - إذا كان $E_F < E_C - 3 kT$ ارسم توزيع الإلكترونات فى نطاق التوصيل.

ب- احسب تركيز الإلكترونات المناظر للمعادلتين (2-14-b)، و(2-16-a).

٩- ١- تحقق من صحة التعبيرين بالفقرة الفرعية (٢-٥-١) عند $T = 300 \text{ K}$:

$$N_C = (2.510 \times 10^9 / \text{cm}^3) (m_n^* / m_o)^{3/2}$$

$$N_C = (2.510 \times 10^9 / \text{cm}^3) (m_n^* / m_o)^{3/2}$$

عرض بالقيم :

$$m_o = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ Coul}$$

$$h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ J.sec}$$

ب- باستخدام الكتل الفعالة بالجدول (١-٢) أنشئ جدول للقيم العددية لكل من N_v ، N_c للسيليكون والجرمانيوم وورنخيد الجاليوم .

١٠- أسئلة غير مباشرة وتحتاج إلى تركيز :

١ - رقاقة سيليكون من النوع p ومشابة بانتظام بـ $N_A = 10^{15} / \text{cm}^3$. عند درجة الحرارة $T = 0 \text{ K}$ ، ما هي تركيزات الاتزان لكل من n ، و p .

ب- تم تقطيع شبه موصل بتركيز شوائب N حيث $N \gg n_i$ وكل الشوائب مؤينة .

أيضا $n = N$ و $p = n_i^2 / N$. هل الشابة من النوع المانع أم المتقبل ؟ اشرح .

ج- تركيز الإلكترونات في قطعة من السيليكون عند درجة حرارة 300 K في ظروف الاتزان هو $10^5 / \text{cm}^3$ ما هو تركيز الشواغر ؟

د - في عينة جرمانيوم غير مفككة تحت ظروف الاتزان عند درجة حرارة الغرفة ، عرفنا أن $n_i = 10^{13} / \text{cm}^3$ ، $n = 2p$ ، و $N_A = 0$.

عين قيم n ، N_D .

١١- احسب تركيزات الاتزان للإلكترونات والشغرات داخل عينة سيليكون مشابة بانتظام في الظروف التالية :

١ - $N_D = 10^{15} / \text{cm}^3$ ، $N_A \ll N_D$ ، $T = 300 \text{ K}$

ب- $N_D \ll N_A$ ، $N_A = 10^{16} / \text{cm}^3$ ، $T = 300 \text{ K}$

ج- $N_D = 10^{16} / \text{cm}^3$ ، $N_A = 9 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ ، $T = 300 \text{ K}$

د - $N_D = 10^{14} / \text{cm}^3$ ، $N_A = 0$ ، $T = 450 \text{ K}$

هـ - $N_D = 10^{14} / \text{cm}^3$ ، $N_A = 0$ ، $T = 650 \text{ K}$

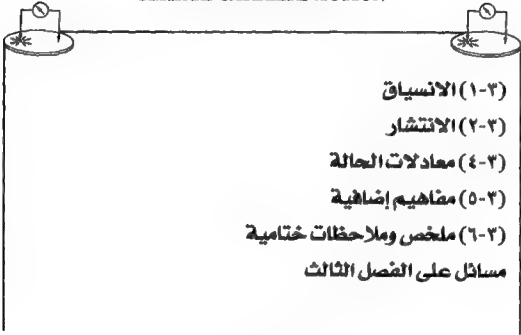
١٢- لكل حالة من حالات المسألة (١١) ، حدد موضع E_i ، احسب $E_F - E_i$ وارسم بعناية مخطط نطاق طاقة بمقياس رسم مناسب . ملاحظة :

$T = 450 \text{ K}$ عند $E_g (\text{Si}) = 1.08 \text{ eV}$

$T = 450 \text{ K}$ عند $E_g (\text{Si}) = 1.08 \text{ eV}$

١٣- طبقا لهذا الفصل فإن الحدود القصوى للإشابة لسيليكون غير مفكك عند درجة حرارة الغرفة هي $N_D \approx 1.6 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ ، و $N_A \approx 9.1 \times 10^{17}$ ، تحقق من صحة هذه الأرقام .

الفصل الثالث
فاعليات حاملات الشحنة
CHARGE CARRIERS ACTION



(١-٣) الانسياب

(٢-٣) الانتشار

(٤-٣) معادلات الحالة

(٥-٣) مفاهيم إضافية

(٦-٣) ملخص وملاحظات ختامية

مسائل على الفصل الثالث



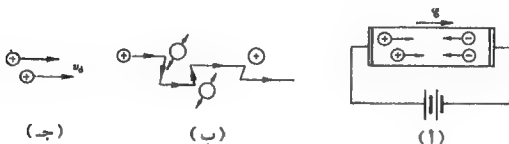
يعتبر النموذج الذى عرضناه فى الفصل السابق للحاملات عند حالة الاستقرار هاما؛ لأنه يشكل المرجع الصحيح لما يليه. لكن من وجهة نظر النباط تصبح الأمور مثيرة للاهتمام فقط عندما تتحرك الحاملات لتشكل تيارا. فالنبيطة عادة ما تكون جزءا من دائرة إلكترونية وعليها أن تستجيب مع تيارات وجهود الدائرة المحيطة بها. وعليه فإن حركة الحاملات هي محور اهتمامنا فى هذا الفصل.

فى ظروف التشغيل الطبيعية توجد ثلاثة أنماط أولية لحركة الحاملات: الانسياب، والانتشار، والتوليد-الالتئام. وستعرض بالشرح والمعادلات لكل نمط على حدة وعلاقته بالتيار المار فى شبه الموصل. وبعد الجمع الحسابى لفعل الأنماط المختلفة نصل بالنهاية للمعادلات الأساسية التى تحكم عمل حركة الحاملات فى النباط. نتهى هذا الفصل بأتملة مبسطة لتوضيح طرق حل هذه المعادلات ولتقديم مبادئ إضافية مهمة.

(١-٢) الانسياب Drift

١-٢-١ الانسياب - تعريف وتصوير Drift - Definition and Visualization

الانسياب هو حركة الجسم المشحون بفعل المجال الكهربى. دعونا نتخيل أننا نستطيع رؤية الجسيمات المجهريّة داخل شبه الموصل. إذا افترضنا أن المجال الكهربى يتجه من اليسار إلى اليمين (شكل ١-٣). يؤثر هذا المجال على الجسم المشحون بقوة فيدفع حاملة الشحنة الموجبة (الشغرة) فى نفس اتجاه المجال بينما يدفع حاملة الشحنة السالبة (الإلكترون) فى الاتجاه المضاد. والمفترض أن تتسارع هذه الحاملات بفعل القوة



شكل (١-٣) تصوير انسياب الحاملة :

١ - حركة الحاملات داخل شبه الموصل يؤثر عليه مجال كهربى ناتج من جهد التحيز.

ب - انسياب شغرة على مستوى القياس المجهري أو الذرى.

ج - انسياب الحاملة على القياس الكبير (الماكرو سكوبى).

الناجمة عن المجال فتسير فى خطوط مستقيمة، ولكن هذا لا يحدث والذى يحدث فعليا أن مسارات الإلكترونات والشفرات تأخذ اتجاهات عشوائية بسبب التصادم مع أيونات الشوائب أو بسبب التصادم مع اهتزازات أنوية شبه الموصل نفسه. فعند درجة حرارة الغرفة تهتز أنوية شبه الموصل حول مواضعها فى الشبكة بفعل الطاقة الحرارية. وبسبب حوادث التصادم هذه فإن حاملات الشحنة تتوقف (أى تهبط سرعتها إلى الصفر) عقب كل حادث تصادم كما فى شكل (٣-١ ب) ثم تعاود الحركة مرة أخرى.

من الواضح إذن أن تفاصيل حركة الانسياب لجسيم مفرد ليس فى مقدورنا معرفتها بدقة، ومن حسن الحظ أن الكميات التى يمكننا قياسها فى المعمل مثل التيار الكهربى تمكس فى الواقع متوسط حركة جميع الجسيمات معا. وعند إجراء المتوسط على كل الإلكترونات والشفرات عند أى زمن سنجد أن حركة كل حامل شحنة على حدة يمكن وصفها بحركة بسرعة انسياب ثابتة v_d . أى على مستوى شبه الموصل ككل، يمكن اعتبار أن حاملات الشحنة تسير فى خطوط مستقيمة موازية للمجال الكهربى وفى نفس اتجاهه (فى حالة الشفرات) أو فى عكس اتجاهه (فى حالة الإلكترونات) كما هو مبين فى الشكل ٣-١ ج).

من المهم أن نذكر أن الحركة الفعلية لحامل الشحنة عبارة عن مجموع حركتين: الأولى، حركة انسياب منتظم بفعل المجال الكهربى كما ذكرنا آنفا، أما الثانية، فحركة عشوائية ناتجة عن تصادم الحامل مع اهتزازات شبكة شبه الموصل، وبالتالي فإن الإلكترونات فى نطاق التوصيل والشفرات فى نطاق التكافؤ فى حالة تبادل -خذ وهات- للطاقة مع شبكة شبه الموصل من خلال هذه التصادمات. وتصل هذه السرعات لمائة ألف متر فى الثانية ولكن لكونها عشوائية الاتجاه فإن محصلتها تكون صفرا كما هو مبين بالشكل (٣-٢)، وبالتالي فإننا نسقطها من حساباتنا ونكتفى فقط بسرعة الانسياب التى وإن كان أصغر كثيرا من السرعة الحرارية إلا أن لها محصلة غير صفرية، وبالتالي تسبب تيارا يسمى بتيار الانسياب.



شكل (٣-٢) شكل مكبر للحركة الحرارية لحاملة

٢-١-٢ تيار الانسياب Drift Current

نتناول هنا التعبير الرياضى التحليلى لتيار الانسياب داخل شبه موصل . نعرف أن التيار هو مقدار الشحنة التى تمر خلال وحدة الزمن عبر مستوى عمودى على اتجاه سريان التيار . ولناخذ شبه موصل من النوع p على هيئة قضيب له شكل متوازى مستطيلات كما هو مبين بالشكل (٣-٣) وله مساحة مقطع A ونختار المستوى A الذى ستعبر الشحنة خلاله داخل القضيب (الجزء المظلل بالشكل) ليكون عموديا على اتجاه سرعة الانسياب v_d . وإذا كان p هو تركيز الشفرات (أى عدد الشفرات داخل وحدة الحجم) نستطيع القول أن:

$v_d t$... أى شجرة على هذه المسافة (أو أقل منها) ستعبر المستوى A خلال الفترة الزمنية t .

$v_d t A$... كل الشفرات داخل هذا الحجم ستعبر المستوى A خلال زمن t .

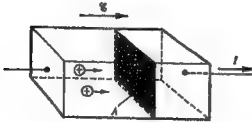
$p v_d t A$... هو عدد هذه الشفرات التى ستعبر المستوى خلال زمن t .

$q p v_d t A$... هى الشحنة التى ستعبر المستوى خلال زمن t .

$q p v_d A$... هى الشحنة التى ستعبر المستوى خلال وحدة الزمن، وتمثل تيار انسياب الشفرات I_{pdrift} .

إذن تيار انسياب الشفرات :

$$I_{pdrift} = q p v_d A \quad (3-1)$$



شكل (٣-٣) منظر بمحاذاة لموصل من النوع p تحت جهد الانحياز (المسبب) للمجال E ومساحة مقطعه A .

للتخلص من مساحة المقطع نلجأ إلى تعريف كمية متجهة هى كثافة التيار J . J هو متجه فى اتجاه سريان التيار ومقدار هذا المتجه هو التيار الذى يعبر وحدة سطح (أى أن $J=I/A$)، وبالتالي يمكننا كتابة التعبير .

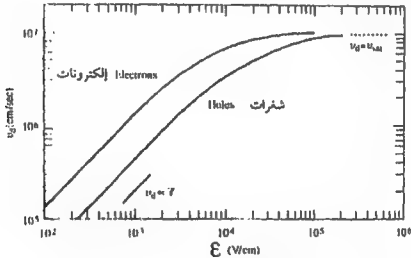
$$J_{pdrift} = q p v_d \quad (3-2)$$

بما أن تيار الانسياب يحدث بفعل المجال الكهربى، فمن الطبيعى أن نخطو خطوة أخرى ونعبر عن كثافة التيار بدلالة للمجال الكهربى . للوصول لهذا الهدف نستخدم

العلاقة بين المجال الكهربى وسرعة الانسياب كما هى موضحة بالشكل (3-4). بالنظر لهذا الشكل يتضح لنا أن فى حالة المجال الكهربى الضعيف فإن السرعة تكون متناسبة مع شدة المجال، وفى حالة المجال الكهربى القوى فإن السرعة قد تصل إلى سرعة التشبع v_{sat} ولا تزيد عنها، أى أن :

$$v_{el} = \begin{cases} \mu E & \dots \quad E \rightarrow 0 \\ v_{sat} & \dots \quad E \rightarrow \infty \end{cases} \quad (3-3)$$

الثابت μ هو ناتج قسمة السرعة على المجال عندما يكون المجال غير قوى، ويختلف باختلاف نوع الحامل إلكترون أو شفرة، وبالتالي يوجد ثابتان أحدهما للإلكترونات μ_n ، والآخر للشفرات μ_p .



شكل (3-4) سرعة انسياب الحاملات v_d المقاسة لسيليكون فائق النقاء عند درجة حرارة الغرفة كدالة فى المجال الكهربى المطبق E

من الآن فصاعدا سيقصر كلامنا على حالة المجال الكهربى الضعيف أو المتوسط، وبالتالي فإن سرعة الانسياب ستكون متناسبة مع المجال، وبالتعويض من المعادلة (3-3) فى المعادلة (3-2) نجد أن :

$$J_{phatit} = q \mu_p p E \quad (3-4-a)$$

$$J_{n/hatit} = q \mu_n p E \quad (3-4-b)$$

الثابتان μ_p و μ_n يعرفان بحركية الشغرات وحركية الإلكترونات على التوالي. وهما ثابتان موجبان على الدوام. لاحظ أنه في حالة الإلكترون تكون السرعة ضد المجال $(v_d = -\mu_n E)$ ، لكن عند ضرب السرعة السالبة في الشحنة السالبة، فإن التيار الناتج يكون موجبا $(J_{ndrift} = q \mu_n n E)$ أى باتجاه المجال مثله مثل تيار الشغرات.

٣-١-٢ الحركة (الانتقالية) Mobility

من الواضح أن الحركية هي وسيط (بارامتر) أساسى لتمييز الانتقال بالانسياب للإلكترونات والشغرات، وكما سنرى لاحقا فإن الحركية ستلعب دورا هاما في تحديد أداء نبائط عديدة، وبالتالي ستعرف هنا على بعض الخصائص الأساسية لهذا الوسيط المهم، والتي يمكن أن نفيدنا لاحقا.

الوحدة القياسية للحركية هي $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ ، في حالة السيليكون المشاب بنوعى الشوائب $N_A = 10^{14}/\text{cm}^3$ ، و $N_D = 10^{14}/\text{cm}^2$ عند درجة حرارة الغرفة فإن $\mu_p = 1360 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ ، و $\mu_n = 460 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$.

أما في حالة Ga As النقى غير المعوض (أى فيه N_A ، أو N_D أقل من $10^{15}/\text{cm}^3$) فإن الحركية عند درجة حرارة الغرفة تكون عالية فى حالة الإلكترونات $\mu_n \approx 8000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ ، وفى حالة الشغرات تكون حوالى $\mu_p \approx 400 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ ، نستخدم القيم الموضحة سابقا عندما نريد إجراء حسابات تقريبية سريعة. نلاحظ أن حركية الإلكترونات تفوق حركية الشغرات، وهذا هو الحال دائما في كل أشباه الموصلات الهامة.

علاقة الحركية بالاستطارة:

الحركية كلمة توحي بإمكانية الحركة بيسر، وهنا أيضا فإن الحركية فى شبه الموصل تعبر عن مدى سهولة تحرك حامل الشحنة. زيادة عدد التصادمات تؤدي إلى تقليل الحركية أى أن الحركية تتناسب عكسيا ومعدل التصادمات أو الاستطارة الحادثة فى وحدة الزمن. وآليات الاستطارة السائدة فى شبه الموصل غير المفكك، عادة ما تكون:

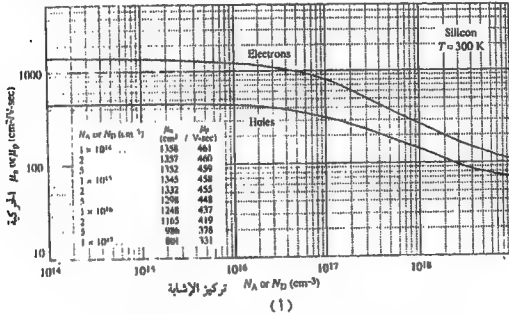
أ- استطارة الشبيكة حيث تصادم الإلكترونات والشغرات مع الذرات المهتزة بسبب الطاقة الحرارية.

ب- الشوائب المتأينة أى استطارة الحاملات مع المجال الكهربى الناتج عن الشوائب المتأينة سواء المانحة منها والمتقبلة. لاحظ أن المجال الكهربى الناتج عن وجود ذرات شبه الموصل المضيف قد تم أخذه فى الاعتبار من خلال تعيين كتلة فعالة للجسيم الحامل للشحنة.

المعالجة الرياضية التفصيلية التي تربط الحركية مع الاستطارة هي من التعقيد يمكن لدرجة أننا لن نتعرض لها هنا ونكتفى بذكر أن الحركية μ تساوى $\langle \tau \rangle / m^*$ ، حيث $\langle \tau \rangle$ هو الزمن الحر، وهو متوسط الفترة الزمنية بين استطارتين متتاليتين لنفس الحاملة. و m^* هي الكتلة الفعالة للتوصيل، وحيث إن زيادة التصادمات المعوقة ينجم عنها نقص في الزمن الحر $\langle \tau \rangle$ فنستنتج مرة أخرى أن الحركية تتناسب عكسياً ومعدل الاستطارة. تتأثر الحركية أيضاً بكتلة حامل الشحنة حيث تزيد في حالة الكتل الصغيرة وتقل للكتل الكبيرة. مثلاً: m_n^* في حالة GaAs تكون أصغر منها في حالة السيليكون، وبالتالي هذا يفسر تفوق حركة الإلكترون في GaAs عن مثيلتها بالسيليكون.

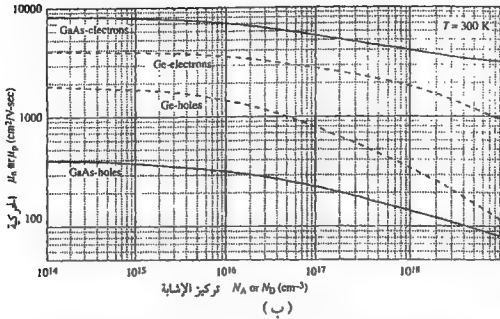
علاقة الحركية بالإشابة

تظهر هذه العلاقة بوضوح في الشكل (٣-٥) في كل الحالات لا تتغير الحركية كثيراً طالما أن تركيز الإشابة دون $10^{15}/\text{cm}^3$ ، وبعد ذلك تؤدي زيادة الإشابة إلى هبوط



شكل (٣-٥) حركية الحاملات عند درجة حرارة الغرفة كدالة في تركيز الإشابة
١- في السيليكون، ب- في الجرمانيوم، و C- في GaAs

μ_n هي حركية الإلكترون بينما μ_p هي حركية الشفرة



تابع شكل (٣-٥) حركة الحاملات عند درجة حرارة الغرفة كدالة في تركيز الإشابة
 ١- في السيليكون، ب- في الجرمانيوم، وفي GaAs
 μ_n هي حركة الإلكترون بينما μ_p هي حركة الشفرة

الحركية . يمكننا تفسير تغير الحركية بالنظر للشكل (٣-٦) . هذا الشكل يمثل مقاومتين على التوالي، ترتبط المقاومة R_L باستطارة الشبيكة والمقاومة R_I باستطارة الشوائب . عند التركيز المنخفض للشوائب يمكن إهمال الاستطارة الناتجة عن أيونات الشوائب بالنسبة لتلك الناتجة عن اهتزازات الشبيكة أى المقاومة الكلية R_{TOTAL} تكون متساوية تقريبا للمقاومة R_I . وعندما تسيطر استطارة اهتزازات الشبيكة والتي لا تعتمد على التركيزات N_A أو N_D فمن الطبيعي أن تصبح الحركية غير معتمدة على N_A ، أو N_D . ولكن إذا زادت هذه التركيزات عن $10^{15}/\text{cm}^3$ فإننا لا نستطيع إهمال الاستطارة الناتجة عن وجود



شكل (٣-٦) المناظر الكهربى للاستطارة في شبه موصل R_L ، R_I تمثلان معاودة الحركة نتيجة لاستطارة الشبيكة واستطارة الشوائب الثابتة على التوالي،
 R_L لا تتأثر بالإشابة وتقل مع انخفاض T .
 R_I تزيد مع زيادة N_A أو N_D وتزيد مع ارتفاع T .

أيونات الشوائب. فى هذه الحالة فلن إضافة مزيد من الشوائب المستقبلية أو المانحة يؤدي إلى زيادة عدد مراكز الاستطارة، وهذا يعنى مزيدا من انخفاض قيمة حركية حاملات الشحنة.

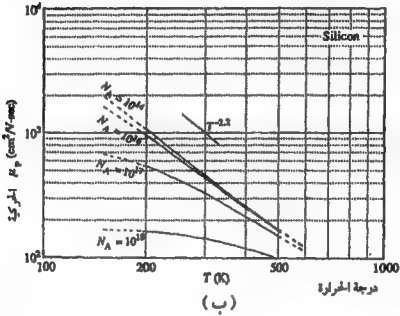
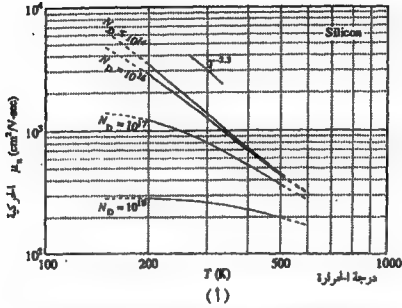
علاقة الحركية بدرجة الحرارة :

يبين الشكل (٣-٧) تغير حركية الإلكترونات والشغرات بالسيليكون مع تغير درجة الحرارة عند تركيزات شوائب مختلفة. كل منحني بالشكل يمثل تركيز شوائب مختلفة. نلاحظ أن عند تركيزات شوائب (N_D أو N_A) أقل من $10^{14}/\text{cm}^3$ ، فإن البيانات تتوحد فى منحنى واحد يشمل كل هذه التركيزات. يتغير هذا المنحنى مع درجة الحرارة بعلاقة أسية، بأس ثابت تقريبا أى أن: $\mu_n \propto T^{-2.3 \pm 0.1}$ ، وكذلك: $\mu_p \propto T^{-2.2 \pm 0.1}$.

وبما أن المحاور فى الشكل (٣-٧) هى محاور لوغاريتمية فإن علاقة الحركية مع درجة الحرارة بالكلفن تظهر كعلاقة خط مستقيم بقيمة ثابتة وسالبة للميل وتساوى الأس -2.3 ± 0.1 فى حالة الإلكترونات، ويساوى -2.2 ± 0.1 فى حال الشغرات. مع زيادة تركيزات الشوائب عن $10^{14}/\text{cm}^3$ نجد أن الحركية ما زالت تزيد مع انخفاض درجة الحرارة، ولكن يقل ميل الخط.

من السهل تفسير علاقة الحركية بدرجة الحرارة فى حالة تركيزات الشوائب المنخفضة. نحن نعرف أن فى هذه الحالة، تكون استطارة الشبيكة، هى المهيمنة، وبالتالي $R_{TOTAL} \approx R_L$ فى العينات المنخفضة الإشابة. ومع انخفاض درجة الحرارة تقل الاهتزازات الحرارية المسببة للاستطارة، ومن ثم تقل الاستطارة بالشبيكة، وفى هذه الحالة تتبع علاقة الحركية بدرجة الحرارة قانونا أسيا بسيطا بأس سالب.

من جهة أخرى، تنصرف العينات العالية الإشابة بطريقة أعقد لوجود استطارة الشوائب بجانب استطارة الشبيكة. ففى الوقت الذى تقل فيه استطارة الشبيكة مع انخفاض درجة الحرارة نجد أن استطارة الشوائب تزيد مع نقص درجة الحرارة؛ ذلك لأن خفض درجة الحرارة يؤدي إلى تباطؤ سرعة الإلكترونات والشغرات، وبالتالي تخفى وقتا أطول بجوار أيون الشائبة مما يؤدي إلى استطارتها من على الأيون المشحون بصورة أشد. أى أن مجال كولومب الكهربى الناشئ عن أيون الشائبة يحرف مسار حاملات الشحنة البطيئة -حيث التباطؤ يكون بسبب انخفاض درجة الحرارة- بصورة أكثر فاعلية. ومن هذه الصورة نجد أن استطارة الشوائب تزيد مع نقص درجة الحرارة، أى أن: $R_{TOTAL} \rightarrow R_i$ مع انخفاض درجة الحرارة.



شكل (٧-٣) الاعتماد على درجة الحرارة T لحركية: أ- إلكترون، ب- شحنة في السيليكون الشباب من $10^{14} / \text{cm}^3$ حتى $10^{18} / \text{cm}^3$. الخطوط المنقطعة امتدادات تقريبية خارج المدى $200 \text{ K} \leq T \leq 500 \text{ K}$

٤-١-٣ المقاومة Resistivity

ترتبط المقاومة الكهربائية ارتباطاً وثيقاً مع حركية حاملات الشحنة. فمن الناحية الكيفية تعبر المقاومة عن إعاقة سريان التيار داخل المادة بسبب خصائص داخلية في هذه

المادة ولكن لا تعتمد على أبعاد العينة. أما من الناحية الكمية فإن المقاومة هي ثابت تناسب المجال الكهربى \mathcal{E} داخل المادة مع قيمة التيار الذى يمر خلال وحدة المساحات (كثافة التيار J)، أى أن :

$$\mathcal{E} = \rho J \quad (3-5-a)$$

أو :

$$J = \sigma \mathcal{E} = \frac{1}{\rho} \mathcal{E} \quad (3-5-b)$$

حيث توصيلية المادة σ تساوى مقلوب المقاومة $\rho = \frac{1}{\sigma}$. فى المادة المتجانسة $J = J_{\text{diff}}$ ، وبالتالي فمن العلاقة (4-4) نحصل على :

$$J_{\text{diff}} = J_{n\text{diff}} + J_{p\text{diff}} = q (\mu_n n + \mu_p p) \mathcal{E} \quad (3-6)$$

وبالتالى :

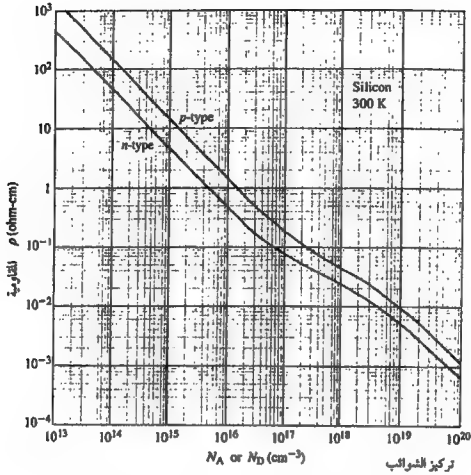
$$\rho = \frac{1}{q (\mu_n n + \mu_p p)} \quad (3-7)$$

فى حالة شبه الموصل غير المفكك المشاب بشوائب مائحة وعند المنطقة المكتسبة (extrinsic) من مناطق درجات الحرارة، حيث $N_D \gg n_i$ ، وبالتالي $n \approx N_D$ ، و $p \approx n_i/N_D \ll n$ ، وقد توصلنا لهذه النتيجة من قبل فى الفصل السابق. وفى حالات الإشابة النمطية فإن $\mu_n n + \mu_p p \approx \mu_n N_D$ فى النوع n . وبالمثل فى حالة شبه الموصل من النوع p فإن $\mu_n n + \mu_p p \approx \mu_p N_A$ ، ونتيجة لذلك، يمكن تبسيط العلاقة (3-7) فى عينات السيليكون العادية إلى :

$$\rho = \frac{1}{q \mu_n N_D} \quad \text{نوع } n \quad (3-8-a)$$

$$\rho = \frac{1}{q \mu_p N_A} \quad \text{نوع } p \quad (3-8-b)$$

بالرجوع لبيانات اعتماد الحركية على الإشابة وباستخدام المعادلتين (3-8) يمكن الربط بين المقاومة (التي يمكن قياسها مباشرة) وبين الإشابة داخل شبه الموصل. النظرة الفاحصة إلى المعادلات (3-8) وكذلك المنحنيات الموضحة بالشكل (٣-٨) تبين أن المقاومة المقاسة يمكن أن تستخدم روتينياً لتحديد تركيزات الإشابة N_D أو N_A .

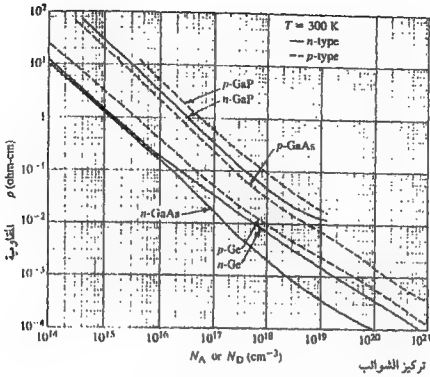


شكل (٣-٨) تغير المقاومة مع تركيز الشوائب عند 300 K للسيليكون

يمكن تحديد المقاومة بغرض تقييم الإشابة بعدة طرق. قد يبدو أن أبسطها هو تصنيع شبه الموصل على هيئة قضيب ثم يوصل طرفيه بمصدر جهد، نقيس التيار المار ثم نستنتج المقاومة من المقاومة المقاسة.

$$\left(\frac{\text{المقاومة} \times \text{الطول}}{\text{مساحة المقطع}} \right) = \frac{\text{الجهد}}{\text{التيار}} = R \text{ (المقاومة)}$$

من سوء الحظ أن هذه العملية ليست بسيطة، كما أن قياس أية رقاقة بهذه الطريقة يؤدي لإتلافها فضلاً عن عدم مناسبة الطريقة للرقائق التي تستخدم في صنع التباطات.

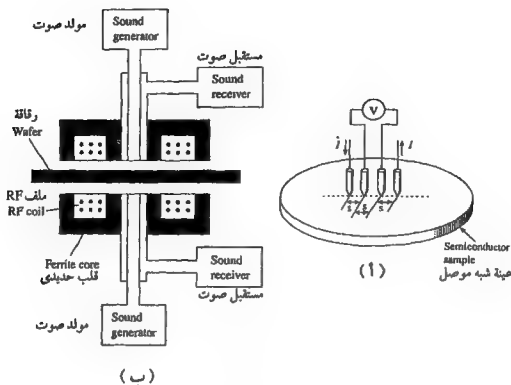


شكل (٣-٨ ب) مثل (١) لكن لأشباه موصلات أخرى

والطريقة الشائعة هي طريقة مجس الأربع نقاط، في هذه الطريقة تصطف أربعة مجسات في خط مستقيم بحيث تكون المسافات بينها متساوية، كما بالشكل (٣-٩) ثم تلامس سطح الرقاقة بالمجسات الأربعة. يمر التيار I بين المجس الجارحين، بينما يستخدم الاثنان الداخليان لقياس فرق الجهد V ، ويمكن تحديد مقاومة شبه الموصل من العلاقة :

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I} \Gamma \quad (3-9)$$

s المسافة بين مجسين متتاليين، و I هو عامل تصحيح معروف مسبقاً. يتحدد العامل Γ طبقاً لسمك الرقاقة، وطبيعة السطح الذي توضع فوقه الرقاقة معدناً كان أم عازلاً. والأجهزة التجارية تحدد العامل Γ بعد أن يدخل المستخدم سمك الرقاقة. هذه الطريقة أكثر مناسبة من الطريقة التي ناقشناها مسبقاً، كما أنها تسبب تلفاً بسيطاً للرقاقة. لكن أحياناً يكون هذا التلف مكلفاً عند تصنيع النماذج والدوائر المتكاملة مرتفعة التكلفة.



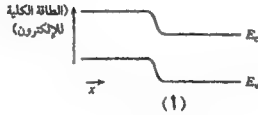
شكل (٣-٩) طرق قياس المقاومة

١ - رسم تخطيطي لترتيب المجسات والأنابيب الكهربي في قياس الأربعة مجسات.
 ب- رسم تخطيطي للجهاز التجاري يحمل بالتيارات الدوامية Eddy current، مينا فيه ملفات التردد العالي RF والمركبات الصوتية.

هناك طريقة أخرى جديدة بالذكر وفيها يتم القياس بدون أى ملامسة للرقاقة، باستخدام التيارات الدوامية. يبين الشكل (٣-٩ ب) تخطيطاً لجهاز تجارى يستخدم تيارات الحث الدوامية. يصدر الجهاز مجالا مغناطيسيا من القلب الحديدي ferrite الذي يحيط به ملف تردد راديو RF. إذا وجدت مادة موصلة بالقرب من القلب المغناطيسى فإن المجال المغناطيسى المتغير RF يستحث تيارات دوامية موضعية بالمادة الموصلة. هذه التيارات تستهلك بعضا من الطاقة التى تغذى إلى الملفات RF. بقياس الجزء المتص من القدرة RF يمكن تحديد المقاومة الصفحية sheet resistivity من خلال نظام معاير يمكن لهذه الأجهزة أن تقيس سمك الرقاقة باستخدام التداخل بين الموجات فوق الصوتية المنعكسة عن سطحى الرقاقة. لذلك يوجد مولدات وكواشف فوق صوتية بهذه الأجهزة. تحدد مقاومة الرقاقة بعد حساب حاصل ضرب المقاومة الصفحية فى سمك الرقاقة.

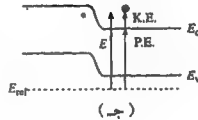
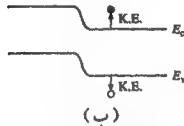
٢-٥ انحناء النطاقات (Band Bending)

عندما تعرضنا لمخططات نطاق الطاقة كنا نرسم سقف نطاق التكافؤ E_V وقاع نطاق التوصيل E_C كخطوط مستقيمة أفقية لتوضيح أن هذين المستويين (E_V, E_C) لهما قيمة ثابتة داخل شبه الموصل. لكن عند وجود مجال كهربي داخلي فإن مستوى الطاقة E_C, E_V سيتغيران من موضع لآخر.

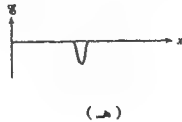
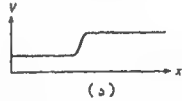


شكل (٣-١٠) العلاقة بين انحناء النطاقين والتغيرات الكهروستاتيكية داخل شبه الموصل

- أ - هيئة مخطط نطاق طاقة موضعا انحناء النطاقين.
- ب - تعريف طاقة الحركة للحاملات.
- ج - تحديد طاقة الوضع.
- د - الجهد الإلكتروني.
- هـ - المجال الكهربي.



رسمت كل هذه التغيرات كدالة في الموضع x كما تم استنباطها من مخطط نطاق الطاقة في الجزء (أ)



كمثال على هذا التغيير انظر الشكل (٣-١٠)، ويعبر عن هذا التغيير بمصطلح انثناء (انحناء) النطاق.

لكى نتعرف بدقة على ماهية العلاقة بين المجال الكهربى داخل شبه الموصل وانثناء النطاق دعونا نتفحص الشكل (٣-١٠)، نجد أن المحور الرأسى فى الجزء (أ) يمثل الطاقة الكلية للإلكترون والتي تتزايد كلما اتجهنا لأعلى. أما المحور الأفقى فيمثل إزاحة الموضع داخل شبه الموصل: من معلوماتنا السابقة نعلم أنه يلزم طاقة مقدارها E_g لكسر رابطة ذرة-ذرة أى لتوليد إلكترون فى قاع نطاق التوصيل وشغرة عند سقف نطاق التكافؤ.

وإذا كانت الطاقة المستتبة $E = E_g$ ، فمما فإن الإلكترون والشغرة الناتجين لن يتوافر لهما أى فائض فى الطاقة أى أنهما سيظلان بدون حركة تقريباً. لكن بامتصاص طاقة $E > E_g$ فإن الفائض $E - E_g$ سيكتسب طاقة حركة KE للإلكترون فى نطاق التوصيل وللشغرة فى نطاق التكافؤ (انظر الشكل ٣-١٠ ب). لتحديد الأمور أكثر نفترض وجود مستوى طاقة مرجعى E_{ref} (ونحن أحرار فى اختيار E_{ref} فى أى مستوى مناسب). كما بالشكل (٣-١٠ ج) وهو المستوى الذى سنقيس منه طاقة الإلكترون الكلية $E - E_{ref}$. تنقسم الطاقة الكلية لقسمين الجزء $E - E_c$ يعبر عن طاقة الحركة للإلكترون، وبالتالي فإن الجزء $E_c - E_{ref}$ سيمثل طاقة الوضع للإلكترون. عادة ما نختار E_{ref} لينطبق على E_v أو على E_c أو عند منتصف المسافة بينهما E_i . هذه الحرية فى اختيار موضع E_{ref} تتفق مع مفهومنا عن طاقة الوضع كما تعلمناه فى الميكانيكا من حيث إنها يمكن أن تقاس من أى مستوى ثابت اختيارى.

تعتبر طاقة الوضع هى المفتاح الذى سيقودنا لفهم العلاقة بين المجال الكهربى داخل شبه الموصل والتغير الموضعى فى نطاقى الطاقة. وبالتحديد سنفترض أن فى الحالة العادية لن تتعرض الإلكترونات والشغرات لقوى مثل تلك الناتجة عن وجود مجال مغناطيسى أو تغيرات موضعية لدرجة الحرارة أو وجود تأثيرات ناشئة عن الإجهادات الميكانيكية الداخلية، وبالتالي تأخذ فى الاعتبار القوى الناتجة عن المجال الكهربى فقط. تخبرنا مبادئ الفيزياء أن طاقة الوضع P.E. لجسم مشحون بشحنة $-q$ وموجود عند نقطة لها جهد كهروستاتيكى V هى:

$$P. E. = -qV \quad (3-10)$$

وقد ذكرنا لتونا أن :

$$P. E. = E_c - E_{ref} \quad (3-11)$$

إذن :

$$V = - \frac{1}{q} (E_i - E_{ref}) \quad (3-12)$$

$$\mathcal{E} = - \nabla V \quad (3-13)$$

حيث ∇ هو مؤثر الانحدار في الفراغ الثلاثي الأبعاد والذي يتول في الفراغ الأحادي البعد إلى مؤثر التفاضل العادي .

$$\mathcal{E} = - \frac{dV}{dx} \quad (3-14)$$

وبالتالي :

$$\mathcal{E} = \frac{1}{q} \cdot \frac{dE_i}{dx} = \frac{1}{q} \cdot \frac{dE_v}{dx} = \frac{1}{q} \cdot \frac{dE_f}{dx} \quad (3-15)$$

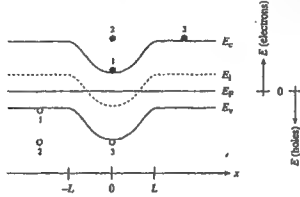
استطعنا كتابة المعادلة (3-15) بهذه الصورة؛ لأنه بجمع قيم ثابتة على E_i ، E_v ، E_f يمكن الحصول على E_f وتفاضل هذه القيم الثابتة هو صفر. بعبارة أخرى E_i ، E_v و E_f متوالية مع بعضها البعض.

تمكنا العلاقة السابقة من تحديد المتغيرات الكهروستاتيكية مثل الجهد الكهربى V ، والمجال الكهربى \mathcal{E} من مخططات النطاق الميئة بالشكل (٣-١٠) أو غيره من الأشكال. تخبرنا المعادلة (3-12) أن منحنى الجهد $V(x)$ لا بد وأن يتغير مثل سالب $E_i(x)$ ، ولهذا فإن الجهد الكهربى V فى الشكل (٣-١٠ د) يماثل المنحنى E_i بعد قلبه رأساً على عقب (بسبب إشارة السالب الموجودة بالمعادلة (3-12)). لا ننسى أنه يمكن لإراحة منحنى الجهد $V(x)$ إلى أعلى أو أسفل بأى قيمة ثابتة؛ لأن موضع الجهد المرجعى $V=0$ يمكن اختياره فى أى مكان على تدريج الطاقة دون أى تأثير على فيزياء الموضوع. فى النهاية فإن إجراء عملية تفاضل للمنحنى $E_i(x)$ (ويمكن إجراء ذلك بمجرد النظر) سيؤدى بنا إلى منحنى المجال الكهربى $\mathcal{E}(x)$ كما هو مبين بالشكل (٣-١٠ هـ).

باختصار، على القارئ أن يدرك أن مخططات انشاء النطاق تحوى معلومات كافية لتحديد الجهد الكهروستاتيكي والمجال الكهربى بداخل شبه الموصل. وبشئ من التدريب يمكن للقارئ رؤية تغير دالة الجهد الكهروستاتيكي $V(x)$ ، أو المجال الكهربى $\mathcal{E}(x)$ بمجرد النظر لمخططات انشاء النطاق. فالمنحنى $V(x)$ يرسم مشابهاً للمنحنى $E_i(x)$ (أو $E_v(x)$ أو $E_f(x)$) بعد قلبه رأساً على عقب، والمنحنى $\mathcal{E}(x)$ هو ميل المنحنى $E_i(x)$

مثال ٣-١ :

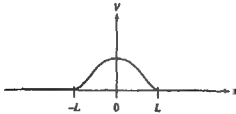
الشكل الموضح أدناه يمثل شكل اثناء نطاق لعينة سيليكون عند $T=300\text{ K}$. اعتبر أن : $E_i - E_F = E_G / 4$ عند الموضعين $x = \pm L$ ، وأن $E_F - E_i = E_G / 4$ عند $x = 0$. لاحظ أننا أخذنا E_F كمستوى مرجعى للطاقة، كذلك لاحظ موضع المواقع المرقمة بالشكل للإلكترونات والشغرات فى الشكل.



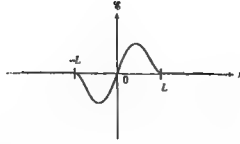
شكل مثال (٣-١)

- ارسم رسماً تخطيطياً للجهد الكهروستاتيكي $V(x)$.
 - ارسم مخططاً لتغير المجال الكهربى E داخل شبه الموصل.
 - حدد طاقة الحركة K.E. وطاقة الوضع P.E. للإلكترونات والشغرات المبنية بالشكل.
 - عين المقاومة للجزء $x > L$ لشبه الموصل.
- [اعتبر الحركية $\mu_p = 459\text{ cm}^2/\text{V-sec}$]
- الحل :

- شكل دالة الجهد هو نفس $E_i(x)$ بعد قلبه رأساً على عقب. إذا اخترنا الجهد $V=0$ عند $x=L$ ينسجم الشكل الآتى :



- المجال الكهربى يتناسب وميول النقاطات :



ج- فى حالة الإلكترونات فإن $K.E. = E - E_C$ ، بينما :

$P.E. = E_C - E_{ref} = E_C - E_F$ وبما أن طاقة الشفرات تزداد مع الاتجاه لأسفل بالشكل فإن $K.E. = E_V - E_F$ ، وكذلك $P.E. = E_{ref} - E_V = E_F - E_V$ فى حالة الشفرات. وفى الجدول التالى نوجز قيم طاقات الحركة $K.E.$ وطاقات الوضع $P.E.$:

$P.E$ (eV)	$K.E$ (eV)	الحاملة
0.28	0.00	إلكترون 1
0.28	0.56	إلكترون 2
0.84	0.00	إلكترون 3
0.28	0.00	شاغرة 1
0.28	0.56	شاغرة 2
0.84	0.00	شاغرة 3

$$E_i - E_F = \frac{E_G}{4} = 0.28 \text{ eV}, (x > L) \text{ فى المنطقة } d -$$

بالتالى :

$$N_A = p = n_i e^{(E_i - E_F)/kT}$$

$$= 10^{10} e^{0.28 / 0.0259}$$

$$= 4.96 \times 10^{14} / \text{cm}^3$$

$$\mu_n = 459 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{sec} \quad \text{وحيث إن :}$$

$$\rho = \frac{1}{q \mu_p N_A} = \frac{1}{(1.6 \times 10^{-19}) (459) (4.96 \times 10^{14})} \quad \text{إذن :}$$

$$\rho = 27.5 \text{ Ohm-cm}$$

مثال ٢-٤ ،

عين مقاومة الجرمانيوم الناتي عند 300 K، والذي له :

$$\mu_n = 3900 \text{ cm}^2/\text{V.sec}$$

$$\mu_p = 1900 \text{ cm}^2/\text{V.sec}$$

الحل :

$$n_i = 2.5 \times 10^{13} / \text{cm}^3 \quad \text{عند } 300 \text{ K}$$

إذن :

$$\rho_i = \frac{1}{q (\mu_n + \mu_p) n_i} = \frac{1}{(1.6 \times 10^{-19}) (5800) (2.5 \times 10^{13})}$$

$$\rho_i = 43 \text{ Ohm-cm}$$

(٧-٣) الانتشار Diffusion

١-٢-٣ تعريف وتصوير Definition and Visualization

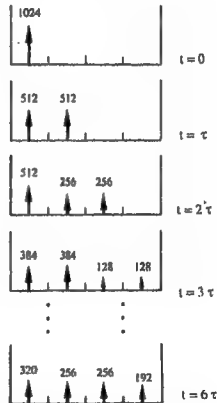
عملية الانتشار هي عملية إعادة توزيع للجسيمات كنتيجة للحركة الحرارية العشوائية وعلى المستوى الماكروسكوبى (الكبير) يتبع عنها هجرة من المناطق ذات التركيز العالى للجسيمات إلى المناطق قليلة التركيز. وإذا ترك الأمر لعملية الانتشار، فإنها تعمل على تساوى تركيز الجسيمات بانتظام فى جميع أرجاء المكان. ولا بد من ملاحظة أن ظاهرة الانتشار تخضع لها كافة الجسيمات المشحونة وغير المشحونة. والحركة الحرارية فقط، هى سبب الانتشار وليست القوى بين الجسيمات بعضها وبعض أو أى قوى أخرى خارجية.

كمثال من الحياة اليومية افترض أنك فتحت غطاء قنينة عطر فى ركن من أركان الغرفة . وحتى فى غياب أى تيارات هوائية بالغرفة ستتکفل الحركة الحرارية العشوائية لجزيئات العطر بنشر رائحة العطر فى كافة أرجاء المكان حتى إلى داخل الشقوق التى لا تستطيع أن تدخل فيها إبرة . وبعد وقت قصير سيتساوى تركيز العطر - بعد نفاذه من القنينة بالطبع - فى كل مكان بالغرفة .

لنراقب ماذا يحدث على المستوى الميكروسكوبى (الصغير)، دعونا نناقش نموذجاً بسيطاً أحادى البعد . فلنأخذ صندوقاً أحادى البعد به أربعة غرف مفتوحة على بعضها البعض، وأن الصندوق يحوى $2^{10}=1024$ جسيماً متحركاً -انظر الشكل (٣-١١)- ولنفترض أن الجسيمات تتبع فى حركتها قواعد صارمة معينة . وبالتحديد فإنه بعد كل τ من الثوانى يقفز الجسيم الموجود فى أى غرفة للغرفة المجاورة . ونظراً لحركته العشوائية فإن احتمال القفز للغرفة على اليسار يساوى احتمال قفزه إلى الغرفة اليمنى (أى كلا الاحتمالين يساوى 50%). إذا قفز الجسيم نحو حائط الصندوق الأيسر أو اليمين (أى لأى من الحائطين بأقصى اليمين أو اليسار) فإنه يعود مرتداً لغرفته الأصلية . وأخيراً نفترض أنه عند الزمن $t=0$ فإن كل الـ 1024 جسيماً متواجدين بالغرفة بأقصى اليسار .

شكل (٣-١١) الانتشار على المقياس المجهري (ميكروسكوبى) فى نظام الفئاضى أحادى البعد، الأرقام فوق الأسهم تمثل عدد الجسيمات فى الغرف (الصناديق) الأربعة .

الأزمة موضحة باليمين .



يسجل الشكل (٣-١١) تطور حركة الـ 1024 جسيم كدالة في الزمن الذي يقاس بوحدات كل منها تساوى τ . عند الزمن $t = \tau$ فإن 512 من الجسيمات ستقرر القفز للغرفة 2 ناحية اليمين والـ 512 الأخرى ستقفز نحو الحائط الأيسر ومن ثم تعود للغرفة 1 مرة أخرى. وعند الزمن $t = 2\tau$ سيقفز 256 جسيما من الغرفة 2 إلى الغرفة 3 ويعود 256 الأخرى للغرفة 1، وبالمثل سيقفز 256 جسيما من الغرفة 1 للغرفة 2 بينما يترد من الحائط الـ 256 الباقية ومحصلة كل هذا أن : عند $t = 2\tau$ يصبح 512 جسيم بالغرفة 1، 256 جسيم بالغرفة 2 و 256 جسيم بالغرفة 3.

بنفس الطريقة تستطيع أن تتابع أعداد الجسيمات في الغرف الأربعة عند الأزمنة $3\tau, 4\tau, 5\tau, \dots$ ، ونلاحظ أنه بعد مرور زمن قدره 6τ يصير التوزيع شبه منتظم، بين الغرف الأربعة، ولا داعى أن نذهب أبعد من ذلك لتوضيح طبيعة عمل عملية الانتشار. في أشباه الموصلات، تحدث عملية الانتشار بطريقة مشابهة مع وجود بعض الفروق الهامة .

أولها: أن حركة الإلكترونات والشغرات داخل شبه الموصل هي حركة ثلاثية الأبعاد وليست في بعد واحد.

ثانيا: الحركة ليست قفز من الغرف، فلا توجد غرف في شبه الموصل، بل هي حركة متصلة زمنيا ومكانيا.

وأخيرا فإن أعداد الجسيمات تكون أكثر بكثير من 1024، لكن في الحالتين يوجد تأثير مشترك سواء في حالة الصندوق الذي افترضناه أو في شبه الموصل يتلخص في أن الجسيمات تهاجر هجرة جماعية من مناطق التركيز العالى إلى مناطق التركيز المنخفض. ونلاحظ أيضا أنه في شبه الموصل تكون الجسيمات -الإلكترونات، والشغرات- مشحونة كهربيا مما يؤدي لوجود ما يسمى بتيارات الانتشار كما هو موضح بالشكل (٣-١٢).



شكل (٣-١٢) تصوير انتشار الإلكترونات والشغرات على المستوى الكبير (لماكروسكوبى) مما يولد «كهربية تيار الانتشار»

خوارزمية لتصوير عملية الانتشار :

يمكنك باستخدام الخوارزمية المذكورة هنا أن تكتب برنامج حاسب باللغة التي تفضلها. عند كل زمن t يكتب البرنامج الزمن t أعلى الرسم ثم يرسم أعمدة بعدد الغرف، ارتفاع كل عمود يتناسب وعدد الجسيمات بالغرفة.

نفترض أن r_n يمثل عدد الجسيمات في الغرفة رقم n حيث n عدد صحيح يأخذ القيم 1، 2، 3، ... حتى عدد الغرف N . والخوارزمية المطلوبة هي :

خطوة 1: البداية : $t = 0$ ، اختر الأعداد الابتدائية r_n كما يحلو لك، ارسم الأعمدة.

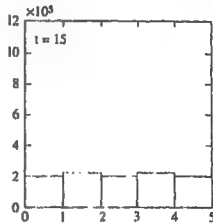
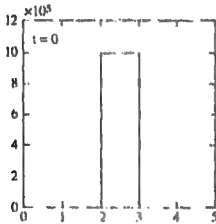
خطوة 2: $t+1 \leftarrow t$ ، $r_1 \leftarrow 0.5(r_1 + r_2)$ ، للغرف 2 حتى $N-1$:

$r_N \leftarrow 0.5(r_{N-1} + r_N)$ ، ارسم الأعمدة.

خطوة 3: كرر الخطوة 2 لاي عدد من المرات تختار مثلاً لعشر مرات (أي حتى $t=10$) مع وضع فاصل زمني (Pause) لمدة ثانية بين كل خطوة والتي تليها :

خطوة 4: نهاية الخوارزمية.

عند تنفيذ البرنامج ستري بوضوح أنه بعد عدد قليل من الخطوات ستساوى ارتفاع الأعمدة بفرض أنك وضعت كل الجسيمات في الغرفة الأولى في البداية، أما إذا وضعت الجسيمات في البداية بالتساوي بين كل الغرف سنرى أن الأعمدة ستظل متساوية الارتفاع في كل الأزمنة. كما هو مبين في الشكل الآتي الذي يبين عينة من خرج الحسابات.

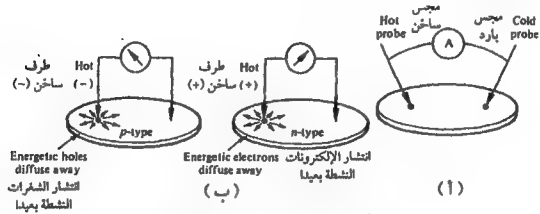


«عينة من خرج الحسابات»

٣-٢-٢ القياس بمجس النقطة الساخنة Hot-point Probe Measurement

يستخدم القياس باستعمال مجس النقطة الساخنة للتعرف سريعا على نوعية شبه الموصل هل هو من نوع n أم النوع p ؟ هذه المعرفة أساسية من الناحية العملية، ويجب أن تتوفر قبل إجراء أى تصنيع نبائط من مادة شبه موصل.

بل يجب معرفة نوع شبه الموصل حتى قبل قياس المقاومة عند الحاجة لمعرفة تركيزات الإشابة (ارجع للشكل (٣-٨)). نورد هذه الطريقة هنا لأنها تعتبر مثالا على استخدام الانتشار لإجراء قياس عملي.



شكل (٣-١٣) قياس مجس النقطة الساخنة
١ - المعدات المطلوبة. ب- تفسير مبسط لكيفية عمل القياس

بالنظر للشكل (٣-١٣) سيتضح لنا أن كل المطلوب لعمل هذا القياس مجس ساخن ومجس بارد وميللي أميتر من النوع الذى يكون فيه صفر التدرج فى المنتصف، أى من النوع الذى يعطينا التيار مقدارا واتجاها. والقياس هنا بسيط للغاية. بعد التأكد من أن المجس الساخن قد قام بتسخين منطقة شبه الموصل الملامسة له نلاحظ انحراف مؤشر الميللي أميتر، ويعطى اتجاه الانحراف نوع شبه الموصل، وإذا أردنا زيادة قراءة الميللي أميتر يمكننا تقريب المسافة الفاصلة بين المجسين.

يقدم الشكل (٣-١٣ ب) شرحا مبسطا لكيفية عمل مجس النقطة الساخنة. عند المنطقة الملامسة للمجس الساخن تتولد أعداد كبيرة من الجسيمات النشطة (وسبب نشاطها هو ارتفاع درجة حرارتها). هذه الجسيمات النشطة ستكون غالبيتها شحرات إذا كان شبه الموصل من النوع p ، أو غالبيتها إلكترونات إذا كان من النوع n . فى وجود هذا الموضع ذى الوفرة من حاملات الشحنة النشطة يعمل الانتشار على توزيعها على باقى المواضع، ومن ثم يخلق نقصا للشحنة عند المجس الساخن، أو بقول آخر يعمل

على وجود شحنة سالبة عند المجس الساخن في حالة النوع p أو وجود شحنة موجبة في حالة النوع n ، وبالتالي يكون انحراف المليلى أميتر في النوع p مخالفا للانحراف في النوع n .

٢-٢-٣ الانتشار والتيار الكلى Diffusion and Total Current

تيارات الانتشار

عند تعريف الانتشار وعند التعرف على تأثيره أكدنا على العلاقة المباشرة بين الانتشار والاختلافات الموضعية لأعداد الجسيمات. فلكي يحدث انتشار يجب أن يكون تركيز الجسيمات في موضع أكبر منه في موضع آخر أى بالوصف الرياضى يلزم وجود تدرج غير صفري للتركيز (أى $\nabla p \neq 0$ للشغرات، و $\nabla n \neq 0$ للإلكترونات) وكلما زاد هذا التدرج اشتد فيض الجسيمات. ويعبر رياضيا عن هذه الأفكار بقانون فيك،
:Fick law

$$F = - D \nabla \eta \quad (3-16)$$

حيث F هو الفيض أى عدد الجسيمات لكل cm^2 لكل ثانية التى تعبر مستويا عموديا على اتجاه سريان الجسيمات، η هى تركيز الجسيمات فى cm^3 بينما D يعرف بمعامل الانتشار، ودائما يكون موجب الإشارة.

الإشارة السالبة فى العلاقة (3-16) تبين أن سريان الانتشار يكون فى الاتجاه الذى تقل فيه η بانحدار أكبر. للحصول على كثافة تيار الانتشار للإلكترونات والشغرات نضرب الفيض فى شحنة الحامل.

$$J_{p\text{diff}} = -q D_p \nabla p \quad (3-17-a)$$

$$J_{n\text{diff}} = -q D_n \nabla n \quad (3-17-b)$$

ثابتا التناسب D_p ، و D_n لهما وحدات cm^2/sec ويسميان على التوالى بثابت انتشار الشغرات، وثابت انتشار الإلكترونات. لاحظ اتفاق اتجاه التيارين المستنتجين من العلاقة (3-17) مع الاتجاه المبين فى الصورة الماكروسكوبية لتياري الانتشار الموضحين بالشكل (٣-١٢). ففى حالتى الإلكترونات والشغرات نجد التدرج أحادى البعد موجبا، أى أن $\frac{dp}{dx} > 0$ ، $\frac{dn}{dx} > 0$ (لأن كلا من p ، و n يتزايدان كلما اتجهنا يمينا)، وبالتالي فإن كلا من الإلكترونات والشغرات ستتشر من اليمين إلى اليسار أى فى اتجاه $-x$.

وبذا يكون اتجاه $J_{p\text{diff}}$ فى الاتجاه السالب ($-x$)، بينما اتجاه $J_{n\text{diff}}$ فى الاتجاه الموجب ($+x$).

التيارات الكلية Total currents

ينشأ التيار الكلى أو الإجمالى نتيجة للانتساق والانتشار معا. بجمع تيارى الشغرات والإلكترونات من المعادلتين (3-4)، (3-17) نصل إلى :

$$J_p = J_{p\text{drift}} + J_{p\text{diff}} = q \mu_p p \mathcal{E} - q D_p \nabla p \quad (3-18-a)$$

$$J_n = J_{n\text{drift}} + J_{n\text{diff}} = q \mu_n n \mathcal{E} + q D_n \nabla n \quad (3-18-b)$$

ويكون التيار الكلى المار فى شبه الموصل هو:

$$J = J_p + J_n \quad (3-19)$$

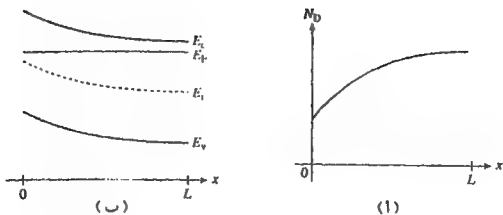
المعادلتان (3-18)، (3-19) وضعتا داخل صندوق مزدوج لتأكيد أهميتهما. فهما يستعملان بطريق مباشر أو غير مباشر فى معظم حالات تحليل عمل التناط.

٤-٢-٣ ربط معاملات الانتشار بالتركيبات

Relating Diffusion Coefficients / Mobilities

من الواضح أن معاملى الانتشار D_p, D_n لهما دور مركزى فى تحديد انتساق الحاملات عن طريق الانتشار. وقد يتبادر للذهن أن علينا أن نوليهما نفس درجة التفصيل والعناية التى أوليناها لتحليل الحركة فى مطلع هذا الفصل. لكن فى الواقع ليس من الضرورى تكرار هذه التفاصيل لسبب بسيط هو أن المعاملات D 's والحركيات μ 's تربطهما ببعض علاقة مباشرة وبسيطة تسمى علاقة آينشتين.

لاستنباط علاقة آينشتين نأخذ شبه موصل غير منتظم الإشابة فى حالة اتزان، (أى درجة الحرارة منتظمة ولا توجد تيارات كبيرة تخل بالاتزان). وما نقصده هو توليع غير منتظم للمانهات مثلا كما بالشكل (٣-١٤) داخل شبه موصل فى ظروف الاتزان.



شكل (٣-١٤) شبه موصل مشاب يغير انتظام
١ - التغير المفترض في الإشابة مع الموضع.
ب - مخطط نطاق الطاقة المناظر.

الشكل (٣-١٤) يبين بروفيل (مخطط جانبي) N_D كدالة في x حيث x المسافة مقاسة داخل شبه الموصل من نقطة على السطح. نعلم من الفصل السابق أن في شبه الموصل المنتظم الإشابة يقترب مستوى فرمي E_F من قاع نطاق التوصيل E_C كلما زاد تركيز المانحات. باختصار، الفاصل $E_C - E_F$ يقل بزيادة N_D . في نفس الوقت بما أن شبه الموصل في الشكل (٣-١٤) في حالة اتزان (لا يوجد تغيير كبير في درجات الحرارة أو تيارات كبيرة) فإن المستوى E_F لا اعتبارات ميكانيكا إحصائية يظل أفقياً دون ميل لكل نقاط شبه الموصل. أي أن $\frac{dE_F}{dx} = 0$ ونعيد هنا التأكيد على هذه النتيجة الهامة: «في ظروف الاتزان يظل مستوى فرمي ثابتاً داخل شبه الموصل وحتى داخل كل المواد الملامسة لهذا شبه الموصل».

ثبات E_F معناه أنه يرسم كخط أفقي مستوى داخل مخططات نطاقات الطاقة.

يمكن البرهنة على صحة مقولة ثبات مستوى فرمي E_F على اتساع العينة في حالة وجود اتزان. من الطبيعي أن نفترض أن الاحتمال $f(E)$ لشغل مستوى الطاقة E لا يتغير بتغير الموضع؛ لأنه إذا زادت $f(E)$ في المنطقة (١) عنها في المنطقة (ب) مستتحرك الجسيمات من (ب) إلى (١) ولكن في حالة الاتزان لا يوجد تيار، وبالتالي $f(E)$ لا تتغير مع الموضع. وبما أن مستوى فرمي يعرف بالعلاقة $f(E_F) = 0.5$ فإن E_F لن يتغير لكل مواضع العينة بل ولكل العينات المتزنة مع هذه العينة.

من أجل التوفيق بين مقولة أن E_F يجب أن يرسم كخط أفقى ومقولة أن $E_C - E_F$ يتناقص مع تزايد تركيز المانحات N_D فإننا نرسم مسخطط انشاء النطاق كما فى الشكل (٣-١٤ ب).

سريان التيار تحت شروط الاتزان :

شروط الاتزان تعنى أن التيار الكلى يساوى صفرا، وبما أن الإلكترونات تتصرف مستقلة عن الشغرات فى حالة الاتزان فإن كثافة التيار الإلكتروني الكلى يساوى صفرا ($J_N = 0$)، وبالمثل لتيار الشغرات الكلى ($J_P = 0$).

وبالرجوع للمعادلة (18-3) نجد أن تيار الانسياب يجب أن يساوى فى المقدار ويعاكس فى الاتجاه تيار الانتشار لكل نوع من الحاملات على حدة.

بالعودة للشكل (٣-١٤ أ) نجد زيادة واضحة فى تركيز اللرات المانحة مع زيادة x ، وبما أن معظم المانحات تكون متأينة فى درجة حرارة الغرفة فهذا معناه أن تركيز الإلكترونات يزيد مع زيادة x أى أنه يوجد $\frac{dn}{dx} > 0$ ، والذي يتسبب فى انتشار الإلكترونات فى الاتجاه $-x$ أو وجود تيار إلكترونى فى الاتجاه $+x$ (لأن شحنة الإلكترون سالبة).

يوجد أيضا انشاء فى نطاقات الطاقة كما هو موضح بالشكل (٣-١٤ ب) وهذا الانشاء يؤدي لوجود مجال كهربي مبيث built-in يتجه نحو $-x$ وهو الذى يسبب تيار انسياب إلكترونى فى الاتجاه $-x$ يلغى تيار الانتشار الإلكتروني لكى يكون التيار الإلكتروني الكلى مساويا للصفر، كما ذكرنا سابقا. فحتى فى حالة الاتزان يمكن وجود تيارات غير صفرية لكن العبرة أن مجموعها لا بد وأن يساوى صفرا. ويمكن النظر للمجال الكهربي المبيث المتولد على أنه رد فعل لوجود تيار الانتشار الناشئ عن عدم انتظام تركيز المانحات.

علاقة آينشتاين :

بعد أن أرسينا الأساس المناسب نشرع الآن فى اشتقاق المعادلة التى تربط المعامل D بالحرية μ والتى تعرف بعلاقة آينشتاين. ولتبسيط الأمور نفترض أننا نعمل فى فراغ أحادى البعد x (أى أن الأمور لا تتغير فى الاتجاه y أو z) وأن العينة محل التحليل هى شبه موصل غير مفكك مشاب بإشابة غير منتظمة وموجود فى حالة اتزان. وقد رأينا أن تيار الإلكترونات الكلى يساوى صفرا أى :

$$J_{N\text{diff}} + J_{N\text{drift}} = q \mu_n n E + q D_N \frac{dn}{dx} = 0 \quad (3-20)$$

لكن نعرف من المعادلة (3-15) أن :

$$\mathcal{E} = \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx} \quad (3-21)$$

وأن :

$$n = n_i e^{(E_F - E_i)/kT} \quad (3-22)$$

وبما أن $\frac{dE_F}{dx} = 0$ ؛ لأن E_F ثابت فإن :

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dx} &= -\frac{n_i}{kT} e^{(E_F - E_i)/kT} \frac{dE_i}{dx} \\ &= -\frac{q}{kT} n \mathcal{E} \end{aligned} \quad (3-23)$$

بالتعويض عن $\frac{dn}{dx}$ فى المعادلة (3-20) من المعادلة (3-23) يتبع أن :

$$(qn \mathcal{E}) \mu_n = (qn \mathcal{E}) \mu_n \frac{q}{kT} D_N = 0 \quad (3-24)$$

وبما أن $\mathcal{E} \neq 0$ ؛ لأن الإشابة غير منتظمة، بالتالى نجد أن :

$$\boxed{\frac{D_N}{\mu_n} = \frac{kT}{q}} \quad \text{علاقة أينشتين للإلكترونات} \quad (3-25-a)$$

$$\boxed{\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q}} \quad \text{علاقة أينشتين للشوائب} \quad (3-25-b)$$

بالرغم أننا افترضنا حالة اتزان لكن يمكن الوصول لنفس النتيجة حتى فى حالة عدم الاتزان (سيكون الاشتقاق أطول مما يدعونا لعدم الدخول فيه). فى حالة شبه الموصل المثلك سيلزم إدخال بعض التعديل للعلاقة (3-25) (وأيضا لن نتعرض لهذه الحالة هنا). ملاحظة أخرى، مبدأ ثبات مستوى فرمى E_F فى حالة وجود اتزان، وتفصيل ما يحدث داخل شبه موصل غير منتظم الإشابة تحت ظروف الاتزان هى موضوعات هامة فى حد ذاتها، أى أن أهميتها ليست مرتبطة فقط باشتقاق علاقة أينشتين. ومن ناحية الأرقام نذكر أن الكمية kT/q لها وحدات الجهد وتساوى 0.02589 V. عند $T = 300 \text{ K}$ (درجة حرارة الغرفة). فلذا افترضنا عينة سيليكون مشابه فيها $N_D = 10^{14}/\text{cm}^3$ ، $\mu_n = 1358 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$ ، فإن D_N تساوى .

$$D_N = \left(\frac{kT}{q} \right) \mu_N = (0.0259) (1358) = 35.2 \text{ cm}^2 / \text{sec}$$

مثال ٣-١٠

سنستمر هنا في فحص عينة شبه الموصل، التي لها شكل نطاق الطاقة المعطى في مثال (١-٣).

أ - هذا الشبه موصل في حالة اتزان. كيف تستنتج هذا من شكل نطاق الطاقة ؟

ب- ما هي كثافة تيار الإلكترونات J_N ، والشغرات J_p عند النقطتين $x = \pm L$ ؟

ج- ارسم مخططاً تقريبياً يصف تغير n ، p مع x داخل العينة.

د - هل يوجد تيار انتشار عند $x = \pm L/2$ ؟ وإذا وجد أشر إلى اتجاه سريانه.

هـ- استناداً لشكل المجال الكهربى بالمثال (١-٣) هل يوجد تيار انسياب عند $x = \pm L/2$ ؟ وإذا وجد عيّن اتجاه سريانه.

و - كم تبلغ قيمة معامل انتشار الشغرات D_p في المنطقة $x > L$ داخل شبه الموصل.

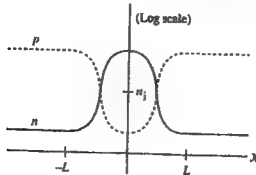
الحل :

أ - نستنتج أن شبه الموصل في حالة اتزان؛ لأن مستوى فرمى E_F ثابت ولا يتغير مع الموضع.

ب- عند $x = L/2$ ، وعند $x = -L/2$ التيارات الكلى $J_N = 0$ ، و $J_p = 0$. بل إن هذا ينطبق على كل المواضع مادام شرط الاتزان مستوفى.

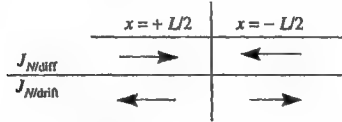
ج- استناداً إلى $n = n_i \exp \{ (E_F - E_i) / kT \}$ ، وأيضا :

د - يمكن رسم تغير n و p مع x هكذا :



د - نعم يوجد تيار انتشار للإلكترونات عند $x = -L/2$ و $x = +L/2$. من إجابة الجزء (ج) نجد أن dn/dx موجب عند $x = -L/2$ ، وبالتالي التيار يسرى فى الاتجاه الموجب ($+x$)، وعلى العكس dn/dx سالب عند $x = +L/2$ ، فيكون اتجاه تيار الانتشار للإلكترونات فى الاتجاه السالب (أى $-x$) عند $x = +L/2$.

هـ- بما أن \mathcal{E} و n ليستا صفرا عند $x = \pm L/2$ ، يصبح تيار الانسياب $J_{Ndrift} = q$ $\mu_n \mathcal{E}$ لا يساوى صفرا. نعلم أن اتجاه سريان تيار الانسياب يتبع دائما اتجاه المجال الكهربى وبالتالي J_{Ndrift} فى الاتجاه السالب عند $x = -L/2$ وفى الاتجاه الموجب عند $x = +L/2$. طبعاً تيار الانسياب لا بد وأن يلغى تيار الانتشار حتى يكون التيار الكلى مساوياً للصفر حسب شروط الاتزان. اتجاهات تيار الإلكترونات يمكن تلخيصها فى هذا الجدول :



و - من الجزء (د) بالتمرين (٣-١) وجدنا أن $N_A = 5 \times 10^{14}$ ، ومن منحنى الحركة -الإشابة فى الشكل (٣-٥) يمكن تحديد الحركة $\mu_p = 459 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$ ، ومن علاقة أينشتين نحصل على : $D_p = (kT/q) \mu_p = (0.0259)(459) = 11.9 \text{ cm}^2/\text{sec}$.

(٣-٢) الالتئام - التوليد Recombination - Generation

٣-٢-١ تعريف وتصوير Definition - Visualization

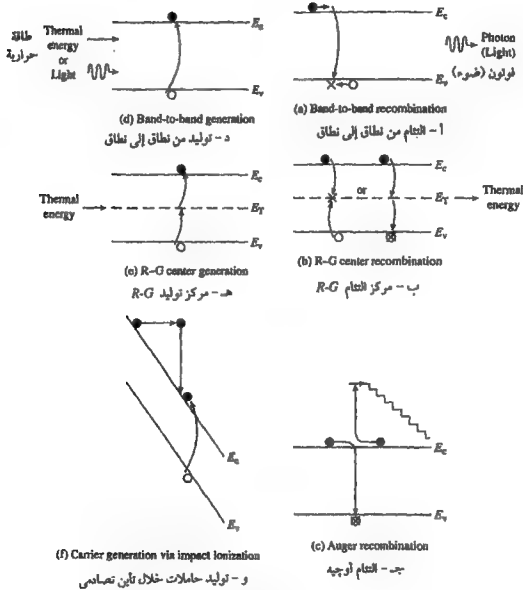
عند قلقة شبه الموصل بعيداً عن الاتزان فلا بد أن تطرأ زيادة أو فقد فى تركيزات الحاملات بعيداً عن قيم الاتزان لهذه التركيزات. الالتئام -التوليد (Recombination - generation) أو باختصار $(R-G)$ هى وسائل الطبيعة لاستعادة الاتزان. وهى تقوم على استقرار قيم الزيادة أو الفقد فى التركيزات فى حالة دوام القلقة أو تؤدي إلى اضمحلال تلك التغيرات بعد زوال سبب القلقة للعودة بالتركيزات لقيم الاتزان السابقة. فى نمط التشغيل العادى، النسيطة عادة ما تكون فى عدم اتزان وهنا تؤدي عمليات الالتئام- التوليد دوراً هاماً فى صياغة مميزات characteristics النسيطة. يمكن تعريف عمليات الالتئام- التوليد كالآتى:

الالتئام : هى العملية التى بموجبها يتقابل إلكترون مع شفرة ويصيران إلى فناء أو روال مع انطلاق طاقة.

التوليد : هي العملية التي تؤدي إلى خلق زوج إلكترون - شحنة بعد امتصاص طاقة .

بعكس الانسياب والانتشار فإن الالتئام أو التوليد ليست عملية واحدة . فهذان المصطلحان يشملان عددا من العمليات المختلفة التي تؤدي إلى فناء أو إنتاج الحاملات .

أهم عمليات الالتئام - التوليد موضحة بالشكل (٣-١٥) ومنشع في شرح تفاصيل هذه العمليات الآن .



شكل (٣-١٥) التصوير من وجهة نظر نموذج نطاق الطاقة لعمليات الالتئام والتوليد

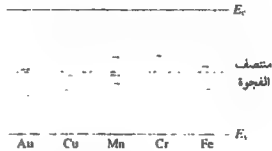
التنام نطاق لنطاق

يعتبر مفهوم التنام نطاق لنطاق هو الأبسط في مجمل عمليات الالتنام. كما هو موضح بالشكل (٣-١٥)، فهو يعنى إفناء مباشر للإلكترون بنطاق التوصيل مع شغرة بنطاق التكافؤ. في أثناء تحرك الإلكترون والشغرة عبر الشبكة قد يتصادف وجودهما بالقرب من بعضهما البعض، أى تواجدهما معا في حيز صغير، عندئذ سيفنى الإلكترون مع الشغرة ويختفيان. والطاقة الناشئة عن عملية الالتنام عادة ما تتحول إلى فوتون ضوئى.

مراكز الالتنام R-G

تحتاج عملية الالتنام الموضحة بالشكل (٣-١٥ ب) لوسيط لكى تتم، بالتالى فإنها تحدث فقط عند مواضع معينة فى شبه الموصل تسمى بمراكز الالتنام R-G. من الناحية الفيزيائية مراكز الالتنام R-G قد تكون عيوباً شبيكية أو ذرات شوائب خاصة مثل ذرات الذهب فى السيليكون. وحتى فى أنقى أشباه الموصلات لا بد وأن توجد عيوب شبيكية وذرات شوائب. لكن فى أشباه الموصلات المستخدمة لصناعة النواقل فعادة ما يكون عدد هذه العيوب أو هذه الذرات الشائبة أقل بكثير من عدد الذرات المانحة والمستقبلة. لاحظ أن الشوائب التى تعمل كمراكز التنام تختلف فى النوع والدور الذى تقوم به عن ذرات الشوائب التى تستخدم كمانحات أو مستقبلات. فمثلاً من وجهة نظر أشكال النطاق لمجد أن الشوائب بصفة عامة تقحم مستويات طاقة فى المنطقة الممنوعة بين نطاقى التوصيل والتكافؤ (فجوة النطاق). لكن بينما تكون مستويات الطاقة الإضافية هذه قريبة من أحد النطاقين فى حالة المانحات والمتقبلات لمجدها فى حالة الشوائب التى تعمل كمراكز التنام R-G بعيدة عن النطاقين وقريبة من منتصف فجوة الطاقة. يرمز لمستوى الطاقة المرتبط بنوع معين من مراكز الالتنام بالرمز E_T (انظر الشكل ٣-١٥ ب). هذه المستويات الواقعة قرب منتصف الفجوة لبعض الشوائب التى تعمل كمراكز التنام موضحة بالشكل (٣-١٦). من هذا الشكل نرى أن العناصر التى تعمل كشوائب مراكز التنام فى السيليكون هى الذهب Au، النحاس Cu، المنجنيز Mn، الكروم Cr، والحديد Fe.

شكل (٣-١٦) إدخال مستويات طاقة قرب منتصف الفجوة نتيجة للشوائب الشائبة فى السيليكون. عندما تدخل شائبة عدة مستويات فإن واحداً فقط هو الذى يهيمن فى حيز مطااة



وكما هو مبين فى الشكل (٣-١٥ ب) فإن عملية الالتئام عند مركز التئام $R-G$ تتم على خطوتين: أولا، يمكث نوع من الحاملات (الإلكترون مثلا) بالقرب من مركز $R-G$ وفى وقت لاحق تصطاد بثر الجهد الناشئ عن وجود الإلكترون المحبوس - الحامل الآخر (الشغرة). وتحدث عملية الالتئام التى تؤدى إلى فناء الحاملتين. ومن وجهة نظر مغايرة يمكن أن نقول أن الإلكترون بالشكل (٣-١٥ ب) يفقد طاقته على مرحلتين: الأولى عند انتقاله من نطاق التوصيل لمستوى الطاقة E_F ، والثانية عندما ينتقل من E_F إلى نطاق التكافؤ حيث يفنى مع شغرة. أحيانا يسمى الالتئام عند مراكز الالتئام $R-G$ بالالتئام غير المباشر. والطاقة الناتجة عن هذا النوع من الالتئام عادة ما تنطلق فى صورة طاقة حرارية أى تنتج اهتزازات شبكية، بلغة ميكانيكا الكم - حيث يعبر عن اهتزازات الشبكة بالفونونات- فإن الالتئام غير المباشر لا يتم إلا من خلال وسيط: إما فونون أو ذرة شائبة.

التئام لوجيه Auger

يسمى هذا الالتئام باسم العالم الفرنسى أوجيه الذى رحل عن عالمنا من سنوات قليلة. الشكل (٣-١٥ ج) يصور ما يحدث. يلتصم إلكترون بشغرة بالتئام نطاق لنطاق لكن الطاقة المنطلقة لا تذهب إلى كمية ضوء (فوتون) ولكن يفور بها إلكترون آخر قريب من موضع الالتئام، هذا الإلكترون الذى لحما من عملية الالتئام؛ (لأن الإلكترون الأول فنى فى الشغرة) يأخذ الصدمة، وبالتالي ينتقل إلى مستوى طاقة عال داخل نطاق التوصيل (أى يكتسب طاقة حركة). ولكنه لا يحتفظ بهذه الطاقة طويلا. فبعد زمن يقاس بالبيكو ثانية (10^{-12} ثانية) يفقد هذه الطاقة للشبكية على هيئة اهتزازات (أى مطلقا فونونات) وهو ما يعبر عنه فى الرسم بالسلم النازل. وكل درجة من درجات هذا السلم تمثل فقدًا للطاقة لأحد الفونونات وهو ما يسمى بالإحمرار $thermlization$. أى أن التصادم مع اهتزازات الشبكة (الفونونات) هو وسيلة ناجعة وسريعة لامتصاص طاقة حركة أى إلكترون ساخن (الإلكترون الذى طاقته فوق قاع نطاق التوصيل).

عمليات التوليد

يمكن عكس اتجاه أى عملية التئام ذكرناها لنحصل على عملية توليد. عملية توليد نطاق لنطاق حيث يستثار الإلكترون مباشرة من نطاق التكافؤ لنطاق التوصيل كما بالشكل (٣-١٥ د). الطاقة اللازمة لتوليد نطاق لنطاق قد تنجم من كمية ضوء (فوتون) أو من الطاقة الحرارية. وإذا كانت الطاقة الممتصة هى الطاقة الحرارية فإن العملية تسمى بالتوليد الحرارى المباشر. أما إذا جاءت من ضوء خارجى ممتص فعندئذ يكون اسمها هو

التوليد الضوئي photogeneration. ويصور الشكل (٣-١٥ هـ) عملية توليد حرارى لكن بمساندة من مراكز $R-G$ التى تعمل كوسيط. وأخيرا فإن التآين الصدمى impact ionization الموضح بالشكل (٣-١٥ و) هو العملية العكسية لالتئام أوجيه. فى هذه العملية يولد زوج الإلكترون -شغرة كنتيجة للطاقة المنطلقة من تصادم حامل شحنة ذى طاقة كافية مع اهتزازات الشبكة. ولكن متى يستطيع حامل الشحنة اكتساب الطاقة اللازمة؟ بالطبع فى وجود مجال كهربي خارجى قوى. وقد يتبادر للذهن سؤال آخر: ماذا نعى بتصادم حامل شحنة مع اهتزازات الشبكة؟ الشبكة بها ذرات على مسافات منتظمة، هذه الذرات تهتز بفعل الطاقة الحرارية، وبالتالي يمكن اعتبارها نواصات صغيرة (النواص هو البندول). هذه النواصات لا تهتز مستقلة الواحدة عن الأخرى بل تهتز بطريقة جماعية؛ لأنها ترتبط ببعضها ببعض بقوى كهربية والتى يمكن تمثيلها بنوابض صغيرة. إذن الشبكة عبارة عن نواصات صغيرة وكل نواص مرتبط بجيرانه بنوابض صغيرة (النابض هو الزميرك). فى هذه الحالة عندما يتصادم إلكترون مع ذرة فإنه لا يتصادم معها بمفردها إنما هو يتصادم مع هذا النظام المهول من النواصات والنوابض المهتزة جماعيا. إن الإلكترون فى حقيقة الأمر يتصادم مع اهتزازات الشبكة (الفونونات) ككل وليس مع ذرة بعينها.

٣-٢ اعتبارات كمية الحركة Momentum Considerations

تحدث الأنواع المختلفة من عمليات الالتئام -التوليد بصفة مستمرة فى كل أشباه الموصلات حتى الموجودة منها فى حالة الاتزان. والذى يميز عملية عن أخرى هو معدل حدوثها. العملية المهيمنة هى تلك التى تحدث بمعدل سريع، وبالتالي فى ظروف معينة نأخذ أن عملية معينة هى الأكثر أهمية وعمليات أخرى احتمال حدوثها ضئيل. فمثلا نأخذ التئام أوجيه. بما أن عدد تصادمات حاملة مع حاملة تتزايد مع زيادة تركيز هذه الحاملات بالتالى نتوقع زيادة توافر التئامات أوجيه مع زيادة تركيز الحاملات، ولذا نهتم بالتئام أوجيه فقط فى المناطق المرتفعة الإشابة داخل النبيطة بينما نهمله فى بقية المناطق. بالمثل يعتبر توليد التآين الصدمى فى المناطق ذات المجال الكهربى العالى داخل النبيطة.

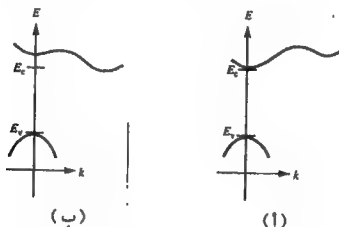
من جهة أخرى يعتبر التوليد الضوئى ذا أهمية فقط عند تعرض شبه الموصل للمضوء. والسؤال هنا ما هى عمليات الالتئام - التوليد التى عادة ما تهيمن عندما يكون المجال الكهربى منخفضا ويكون شبه الموصل مشابها وغير مفكك عند درجة حرارة الغرفة.

هذه هى الظروف التى تكون عليها غالبية مناطق النبيطة. من المعلومات المتوافرة لدينا نستطيع أن نختار الالتئام - التوليد نطاقا لنطاق، وكذلك تلك التى تحدث عبر مراكز $R-G$ كمرشحين أساسيين.

وقد نتوقع ان تتفوق في هذه الظروف عمليات الالتئام - التوليد نطاق لنطاق على عمليات الالتئام - التوليد عبر مراكز $R-G$ ، وذلك عندما ننظر لأشكال نطاق الطاقة. ولكن هذا ليس صحيحا؛ لأن الأشكال التي أوردناها حتى الآن يكون فيها الموضع x هو المحور الأفقى، وبالتالي فلا تحمل أى معلومات عن كمية حركة الحاملات. وفي كل من الميكانيكا الكلاسيكية أو ميكانيكا الكم لا تتغير كمية التحرك الكلية بعد التصادم عنها قبل التصادم. وهنا أيضا تلعب كمية التحرك دورا هاما فى تحديد معدل عملية التئام - توليد.

فى أشكال النطاق من النوع $E-k$ ترسم الطاقات المسموح بها على المحور الرأسى بينما يرسم على المحور الأفقى كمية التحرك (عادة ما نطلق على عدد الموجة k مصطلح كمية التحرك لأنهما متناسبان، فكمية التحرك تساوى عدد الموجة k مضروباً فى ثابت بلانك h أى $p=hk$ ، حيث p هو كمية حركة البلورة).

يمكن تقسيم منحنيات $E-k$ إلى نوعين رئيسيين: النوع الأول يشير إلى ما يسمى بشبه الموصل المباشر حيث تقع أدنى نقطة فى قاع نطاق التوصيل، وأعلى نقطة فى سقف نطاق التكافؤ عند $k=0$. والنوع الثانى والمسمى بشبه الموصل غير المباشر نجد أن أدنى نقطة لنطاق التوصيل تكون عند $k \neq 0$ بينما تظل أعلى نقطة بنطاق التكافؤ عند $k=0$ (انظر الشكل ٣-١٧). وأشهر أنواع أشباه الموصلات المباشرة هى GaAs وعموما فإن كثيرا من أشباه الموصلات المركبة من عناصر العمود الثالث والخامس بالجدول الدورى تكون مباشرة. من ناحية أخرى السيليكون وكذلك الجرمانيوم هى أشباه موصلات غير مباشرة.



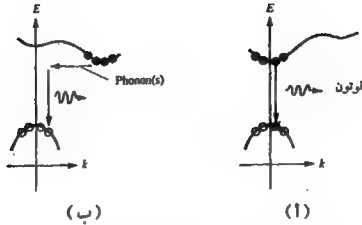
شكل (٣-١٧) الأشكال العامة لمنحنيات $E-k$ فى أشباه الموصلات المباشرة، ب- غير المباشرة

لكى نجعل منحنيات $E-k$ مفيدة فى تصوير عمليات الالتئام - التوليد يجب أن نتنبه لطبيعة الانتقالات الإلكترونية المرتبطة بامتصاص وانبعث الفوتونات أى كمات الضوء والفوتونات أى اهتزازات الشبيكة (لاحظ أن الضوء عبارة عن اهتزازات أيضا لكن اهتزازات للمجالات الكهرومغناطيسية). الفوتونات بطبيعتها تحمل طاقة مناسبة (تكفى لركل إلكترون من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل) ولكن لكون كتلتها الساكنة تساوى صفرا فإن كمية الحركة تبدو صغيرة جدا بالمقارنة بكمية تحرك الإلكترونات فى أشباه الموصلات، وبالتالي فعندما يتسبب فوتون ممتص فى ركل إلكترون من نطاق التكافؤ إلى التوصيل فإن كمية الحركة للإلكترون لا تتغير (إلا تغيرا طفيفا جدا)، ولذا نرمز فى الأشكال $E-k$ للانتقال الإلكتروني المباشر من نطاق لنطاق يسهم رأسى تقريبا. إذا كان السهم لأسفل فهذا معناه التئام نطاق لنطاق مع انبعث فوتون. أما إذا كان للأعلى فهذا معناه توليد نطاق لنطاق مع امتصاص فوتون.

من ناحية أخرى فإن الفوتونات تكون طاقتها متواضعة (من 10 إلى 50 ميلي إلكترون-فولت) لكن نظرا لكتلة ذرات الشبيكة الكبيرة فإن الفوتونات تتمتع بكمية حركة كبيرة وكافية لجعل عمليات الالتئام - التوليد فى أشباه الموصلات غير المباشرة ممكنة. أيضا نريد أن نذكر هنا معلومة تهمننا، وهى أن الإلكترونات تشغل حالات الوادى الأكثر انخفاضا بنطاق التوصيل كما أن الشغرات تشغل حالات الدروة العليا بنطاق التكافؤ، تماما مثلما تستقر الكرة بالموضع الأكثر انخفاضا فى حفرة أو كما يستقر البالون المملء بالهيليوم بالموضع الأكثر ارتفاعا بسقف الحجرة.

دعونا نتفحص الآن عملية التئام نطاق لنطاق. فى شبه الموصل المباشر تكون قيم k للإلكترونات والشغرات قريبة من $k=0$ ، وبالتالي عملية التئام نطاق لنطاق تحدث بإطلاق فوتون واحد، وذلك لعدم الإخلال بقانونى بقاء الطاقة، وكمية الحركة (انظر الشكل ١٨-٣). وفى الناحية الأخرى نجد أن عملية التئام نطاق لنطاق فى شبه موصل غير مباشر تحتاج لتغير كبير فى كمية الحركة. هنا انطلاق فوتون فقط قد يتماشى مع بقاء الطاقة لكنه يتهلك قانون بقاء كمية الحركة. للتوافق مع القانونين معا فلا بد أن يصاحب هذا الالتئام انبعث فوتون يليه انبعث فوتون كما هو مبين بالشكل (٣-١٨ ب).

الطبيعة المعقدة لالتئام نطاق لنطاق فى أشباه الموصلات غير المباشرة والراجعة لضرورة انبعث فوتون وفوتون معا ينتج عنه تباطؤ معدل الالتئام؛ ولهذا نهمل فى السيليكون (وفى كافة أشباه الموصلات غير المباشرة الأخرى) عملية الالتئام نطاق لنطاق



شكل (٣-١٨) التصوير بواسطة منحني $E-k$ لعملية الالتئام في شبه موصل
١- مباشر، ب- غير مباشر.

بالمقارنة مع عمليات الالتئام بمراكز $R-G$. الالتئام نطاق لنطاق ملائم لأشباه الموصلات المباشرة وكفاء للغاية؛ لذا نستخدمه في إنتاج الضوء في نسايط الثنائيات (الدايودات) الباعثة للضوء LED، وليزرات أشباه الموصلات المستخدمة في اتصالات الألياف البصرية وطابعات الليزر ومشغلات ومسجلات الأقراص الضوئية وما شابه ذلك. لكن في أشباه الموصلات المباشرة فإن الالتئام خلال مراكز $R-G$ يكون هو الأسرع (والأكثر حدوثاً) من الالتئام المباشر نطاق لنطاق. ونظراً لتلك الأهمية الشاملة لعمليات الالتئام في مراكز $R-G$ خصوصاً في شبه الموصل الأكثر أهمية أي السيليكون (تذكر أن السيليكون شبه موصل غير مباشر) فإننا سنخصص الجزء القادم لهذا النوع من الالتئام فقط.

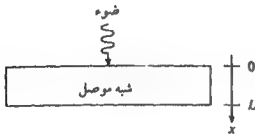
٣-٧-٢ إحصائيات $R-G$ Statistics

إحصائيات $R-G$ هو الاسم الذي يطلق على التوصيف الرياضي لعمليات $R-G$. في هذا التوصيف لن نظور علاقات لكثافة التيار كما فعلنا في الانسياب والانتشار، فعمليات الالتئام - التوليد هي عمليات موضعية بطبيعتها. أي أنها تتم في مواضع بعينها داخل بلورة شبه الموصل، وبالتالي لا تؤدي لانتقال الشحنة. الأكثر دقة أن نقول أن عمليات $R-G$ تعمل على تغيير رمزي لتركيزات الحاملات عند موضع محدد، وبالتالي فالتوصيف الرياضي هنا يعنى حساب المعدلات الزمنية لتركيزات الحاملات أي $\frac{\partial n}{\partial t}$ و $\frac{\partial p}{\partial t}$.

سنداً بالتوليد الضوئي ليسا طته ثم نتقل لعمليات الالتئام - التوليد فى مراكز $R-G$ والتي سميناهما عمليات الالتئام - التوليد الحرارية غير المباشرة .

التوليد الضوئى Photogeneration

نعلم أن الضوء الساقط على عينة شبه موصل كما بالشكل (٣-١٩) يمتص منه جزء ويتعكس الجزء الباقي على سطح المادة . فلو كان هذا الضوء أحادى الموجة أى أن



له طولاً موجياً محدداً λ وتردداً ν ، وكانت طاقة الفوتون $h\nu$ أكبر من فجوة طاقة شبه الموصل E_g فإن هذا الفوتون سيمتص بواسطة شبه الموصل مولداً زوجاً من الإلكترون وشغرة . ويسبب امتصاص الضوء، تقل شدته I مع زيادة مسافة توغله x داخل المادة، أى أن:

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (3-26)$$

شكل (٣-١٩) شبه الموصل، انتشار الضوء واتجاه الموضع x فى تحليل التوليد الضوئى
نفترض أن شبه الموصل سميك بحيث يمكن إهمال الانعكاس من السطح السفلى

حيث تمثل I_0 شدة الضوء تحت السطح مباشرة أى عند $x = 0^+$ (0^+ تعنى عيّن الصفر مباشرة)، و α معامل الامتصاص .

نجد من الشكل (٣-٢٠) أن α تعتمد بشدة على طول موجة الفوتون λ (حيث تزيد α بشدة عندما تقل عن λ_G) $(\lambda_G = \frac{hc}{E_g} = \frac{c}{\nu_G})$.

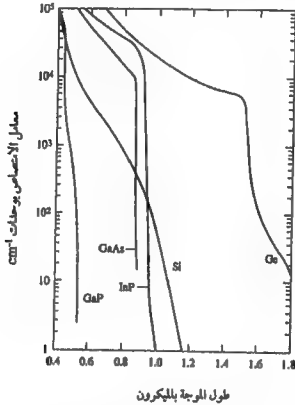
λ_G هو طول الموجة المناظر لفجوة الطاقة E_g . وعادة ما يعبر عن α بوحدات $1/cm$. وبما أن أى امتصاص لفوتون يقابله توليد لزوج إلكترون - شغرة ؛ لذا فإن معدل توليد هذه الأزواج $G_L(x, \lambda)$ يكون متناسباً أيضاً مع $e^{-\alpha x}$ ، حيث G هو أول حرف فى كلمة توليد Generation . و L فى G_L ترمز للضوء light، إذن يمكننا أن نستنتج أن :

$$\frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{light} = \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{light} = G_L(x, \lambda) \quad (3-27)$$

وتكون $G_L(x, \lambda)$ في الوضع الذي تتعرض له هي :

$$G_L(x, \lambda) = G_{LO} e^{-\alpha x} \quad (3-28)$$

حيث G_{LO} هو معدل التوليد الضوئي عند $x=0^+$ معبرا عنه بوحدات عدد لكل cm^3 لكل ثانية $(\text{cm}^{-3} \cdot \text{sec}^{-1})$ الفاصل الرأسى λ_{light} بعد الفواصل الزمنى الجزئى $\frac{\partial n}{\partial t}$ أو $\frac{\partial p}{\partial t}$ وُضع ليميز معدل التوليد الناتج عن امتصاص الضوء عن غيره من عمليات التوليد الأخرى. فى المسائل المتعلقة بالتوليد الضوئى يفترض :



شكل (٣-٢٠) تغير معامل الامتصاص مع طول موجة الضوء فى السيليكون وعدد من أشباه الموصلات الأخرى

أولاً: أن الإضاءة (وبالتالى معدل التوليد الضوئى) منتظمة داخل العينة أى لا تعتمد على موضع النقطة: $G_L(x, \lambda) = G_{LO}$ ويصلح هذا التبسيط إذا كان عمق العينة أقل بكثير من $1/\alpha$.

ثانياً: فى حالة زيادة عمق العينة كثيراً عن $1/\alpha$ ، حيث يكون الضوء قد امتص

بالكامل في طبقة رقيقة جدا قرب سطح شبه الموصل. ونلاحظ من المعادلة (28-3) أنه عند العمق $1/\alpha$ يكون قد امتص من الضوء نسبة قدرها $1-1/e$ أى حوالى 63% ويتبقى فقط 37%، وبالتالي فعند $1/\alpha$ يكون الضوء قد امتص كله، أما عند $x \ll 1/\alpha$ يكون قد امتص من الضوء النذر القليل. وكمثال عندما يكون الضوء بطول موجة $\lambda=0.4\mu\text{m}$ ساقط على السيليكون تصبح $\alpha = 10^5 \text{ cm}^{-1}$ (انظر الشكل ٣-٢) ومن ثم، فإن أى عينة سيليكون بسمك أكبر من ميكرون واحد ($1/\alpha=0.1 \mu\text{m}$) يصبح التبسيط الثانى الخاص بالامتصاص الكلى عند السطح مناسباً جداً.

الالتئام - التوليد الحرارى غير المباشر

لا اعتبارات خاصة بمستوى الكتاب لن نتعرض هنا بالتفصيل للحالة العامة لإحصائيات الالتئام - التوليد. وفي نفس الوقت فإن المعادلة التى تعبر عن حالة خاصة والتى سندكرها هنا، تصلح لتحليل بعض المسائل العملية. أى أننا سنتناول فقط حالة خاصة لتجنب التعقيد الرياضى ولكنها ستعطينا فكرة جيدة عن الموضوع. وستبدأ بإعطاء تعريفات دقيقة لتركيزات الحاملات ومراكز $R-G$ التى نحتاجها فى هذا السياق.

p_o, n_o تركيزات الحاملات بالمادة موضوع التحليل عندما تسود ظروف الاتزان.

p, n تركيزات الحاملات تحت أى ظروف.

$\Delta p = p - p_o, \Delta n = n - n_o$ تعبر عن انحرافات التركيزات عن قيم الاتزان ويوجد أن تكون موجبة فى حالة الزيادة أو سالبة فى حالة النقصان.

N_T عدد مراكز $R-G$ لكل cm^3 .

وما نعنيه بالحالة الخاصة هو افتراض أن الانحرافات $\Delta p, \Delta n$ تكون صغيرة بالنسبة لتركيزات الأغلبية، وتسمى هذه الحالة بحالة الحقن المنخفض المستوى low-level injection، وهو ما يعنى أن القليلة صغيرة نسبياً أو بدقة أكثر:

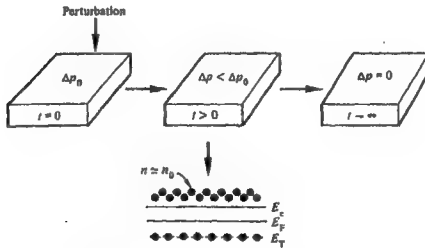
الحقن المنخفض المستوى يعرف بالآتى:

فى المادة من النوع n $\Delta p \ll n_o, n \approx n_o$

فى المادة من النوع p $\Delta n \ll p_o, p \approx p_o$

لنأخذ المثال الآتى : سيليكون فى درجة حرارة الغرفة ومشاب بمناحفات
 $N_D=10^{14}/\text{cm}^3$ تمرض لقلقلة أنتسجت $\Delta p = \Delta n = 10^9/\text{cm}^3$ (أى $10^9/\text{cm}^3$ زوج
 إلكترون - شجرة). إذن لهذه المادة $n_0 \approx N_D = 10^{14}/\text{cm}^3$ و $p_0 \approx n_i^2/N_D \approx 10^6/\text{cm}^3$.
 بالتالى $n = n_0 + \Delta n \approx n_0$ و $n = 10^{14}/\text{cm}^3 \gg p = 10^9/\text{cm}^3$. واضح أننا إزاء حالة
 حقن منخفض. لاحظ أن $p_0 \gg \Delta p$. وعلى العكس من تعداد الأغلبية الذى يظل
 أساسا كما هو فى حالة الحقن المنخفض فإن تعداد الأقلية يتزايد بعدة رتب من المقدار.
 (زيادة رتبة مقدار تعنى عملية ضرب فى عشرة، رتبتين مقدار يعنى الضرب فى مائة،
 ثلاث رتب مقدار تعنى الضرب فى ألف، وهكذا...).

والآن نحن على استعداد لتحليل وضع خاص كالموضح فى الشكل (٣-٢١)،
 حيث تسببت قلقللة عند $t=0$ فى إحداث زيادة فى تركيز الشواغر $n_0 \gg \Delta p$ فى عينة
 سيليكون من النوع n . وعند $t > 0$ نفرض أن النظام سيسترخى ليعود لحالته الأولى
 مستخدما فى ذلك تفاعلات مراكز $R-G$. ما هى العوامل التى ستؤثر فى معدل $\frac{\partial p}{\partial t}$ ؟
 [نضع الحرف R هنا لنذكر أنفسنا أننا نحسب معدل التناقص $\frac{\partial p}{\partial t}$ فى تركيز الشغرات
 بسبب عمليات الالتئام عبر مراكز $R-G$]. لكى نفنى شجرة يلزم انتقالها من نطاق التكافؤ
 لمركز $R-G$ مشغول بالإلكترون. ومنطقيا أن نفترض أنه كلما رادت مراكز $R-G$ المشغولة
 بإلكترونات راد معدل فناء الشغرات، وبالتالي يزداد معدل الالتئام. وفى ظروف الاتزان
 تكون كل مراكز $R-G$ الموضحة بالشكل (٣-٢١) مشغولة بالإلكترونات. لماذا؟ لأن



شكل (٣-٢١) الوضع داخل شبه موصل من النوع n بعد قلقللة مسببت
 زيادة شواغر بحقن منخفض المستوى

مستوى فرمى E_F أعلى من المستوى E_T لمراكز $R-G$ وفى ظل وجود حالة حقن منخفض المستوى ($\Delta p \ll n_p$) فإن عدد الإلكترونات يفوق بكثير عدد الشغرات، وبالتالي تشغيل الإلكترونات أولا بأول أية مراكز $R-G$ خالية؛ لذا يمكننا القول أن عدد مراكز $R-G$ المشغولة يساوى تقريبا عدد المراكز $R-G$ الذى يساوى N_T . وبذا نتوقع أن تتناسب مع $\left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_R$ مع N_T تقريبا. ومن المنطقى أيضا أن نقول أن معدل فناء الشغرات يتناسب مع عددها أيضا. بالتالى $N_T p \propto \left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_R$. وأخيرا $\left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_R$ يجب أن يكون سالبا؛ لأنه يعبر عن فناء (تناقص).

إذن نستنتج أن :

$$\left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_R = - c_p N_T p \quad (3-29)$$

حيث c_p هو مجرد ثابت تناسب بين $\left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_R$ وحاصل الضرب $N_T p$.

ما حسبناه فى (3-29) هو معدل الالتئام، لكن عمليات الالتئام تتعاش طوال الوقت مع عمليات التوليد، وبالتالي لا بد أيضا من حساب معدل توليد الشغرات $\left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_G$. التوليد يتطلب وجود إلكترونات فى نطاق التكافؤ ومستويات خالية بنطاق التوصيل وهذه متوافرة طوال الوقت. العامل المحدد فقط هو وجود الوسطاء من مراكز $R-G$ الخالية من الإلكترونات لتكون همزة الوصل لانتقال إلكترون من نطاق التكافؤ للتوصيل. لكن عدد مراكز $R-G$ الخالية لا يتغير عندما يكون الحقن منخفض المستوى (مستتب ذلك بعد قليل)، وبالتالي $\left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_G$ لا يتغير عن قيمته عند الاتزان $\left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{G_0}$ (مستتب ذلك بعد قليل)، ولكن عند الاتزان لا بد أن يساوى معدلا الالتئام والتوليد أى أن :

$$\left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{G_0} - c_p N_T p_0 = 0$$

∴

$$\left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{G_0} = c_p N_T p_0 \quad (3-30)$$

بالتالى يكون معدل تغير تركيز الشغرات نتيجة تفاعلات مراكز $R-G$ هو :

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{i-\text{thermal}}^{R-G} &= \left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_R + \left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_G \\ &= - c_p N_T (p - p_0) \end{aligned} \quad (3-31)$$

أى أن :

$$\left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{i\text{-thermal } R-G} = - c_p N_T \Delta p \quad (\text{مادة من النوع } n) \quad (3-32-a)$$

وبالمثل :

$$\left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{i\text{-thermal } R-G} = - c_n N_T \Delta n \quad (\text{مادة من النوع } p) \quad (3-32-b)$$

. حيث c_p ، c_n ثوابت موجبة وتسمى معاملات الأسر (أو الاصطياذ).

قبل أن نمضى قُدما علينا أولا تفسير عدم تغير عدد المراكز $R-G$ غير المشغولة حال حدوث حقن منخفض المستوى . إحصائيا يتحدد هذا العدد بالفرق $E_F - E_T$ ولكن E_T ثابت وأيضا E_F لا يتغير فى حالة الحقن المنخفض المستوى؛ لأن الاخير لا يغير كثيرا فى عدد الحاملات الاغلبية، وهذه الأخيرة بدورها هى التى تحدد موضع E_F على أشكال النطاق.

إذن الحقن المنخفض المستوى لا يغير فى عدد مراكز $R-G$ الخالية. ملاحظة أخرى . استعملنا المصطلح $i\text{-thermal}$ بجانب $\frac{\partial p}{\partial t}$ و $\frac{\partial n}{\partial t}$ للدلالة على أننا هنا نحسب هذه المعدلات لحالات الالتصام - التوليد الحرارية غير المباشرة (أى تلك التى تسببها مراكز $R-G$ كلمة حرارية مرتبطة بالقانونات).

بالرغم من أن المعادلتين (3-32) تفيان بالفرض تماما، إلا أننا سنعيد كتابتهما فى صورة أكثر تعبيراً . بالنظر للطرف الأيسر بالمعادلتين (3-32) نجد أن الوحدة المستعملة هى وحدة تركيز / وحدة زمن، وبالتالى حاصل الضرب $c_p N_T$ أو $c_n N_T$ له وحدات مقلوب الزمن؛ لذا ندخل هنا الثابتين الزمنيين التاليين :

$$\tau_p = 1 / c_p N_T \quad (3-33-a)$$

$$\tau_n = 1 / c_n N_T \quad (3-33-b)$$

وبالتالى نعيد كتابة (3-32) فى الصورة :

$$\left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{i\text{-thermal } R-G} = - \frac{\Delta p}{\tau_p} \quad (\text{مادة من النوع } n) \quad (3-34-a)$$

$$\left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{i\text{-thermal } R-G} = - \frac{\Delta n}{\tau_n} \quad (\text{مادة من النوع } p) \quad (3-34-b)$$

بالوصول للمعادلتين (3-34) نكون قد قمنا بالتوصيف الرياضى المطلوب للحالة الخاصة: الالتئام - التوليد عن طريق مراكز $R-G$ (أى الحرارية غير المباشرة) فى ظروف الحقن المنخفض المستوى. وبالرغم من الافتراض الضمنى أن العمليات الحادثة تتغير ببطء عند اشتقاق المعادلتين (3-34) لكن يمكن استخدام نفس المعادلات لمعظم حالات التغير الفجائى transient دون وجود خطأ كبير.

لاحظ أيضا أنه حين تكون Δp سالبة فإن هذا سيؤدى إلى $\partial p / \partial t |_{I-(thermal) R-G} > 0$ أى إلى وجود توليد بمعدل أسرع من الالتئام لتعويض النقص الحادث Δp . إذن الطرف الأيسر فى المعادلتين (3-34) يعبر عن محصلة عمليتى الالتئام والتوليد الحرارية غير المباشرة.

أيضا لا بد من إعادة التأكيد على أن المعادلتين (3-34) ينطبقان فقط على التغير فى تركيز الحاملات الأقلية عند ظروف الحقن المنخفض. وإذا أردنا التعامل مع كل من الحاملات الأقلية والغالبية فى ظروف الحقن المنخفض أو العالى المستوى فعلينا قبول معادلة أعقد قليلا من المعادلة (4-34) وهنا سنعطى هذه المعادلة دون برهان. وعلى القارئ المهتم بالبرهان، النظر فى أحد المراجع المتقدمة والمعادلة العامة هى :

$$\frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{I-(thermal) R-G} = \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{I-(thermal) R-G} = \frac{n_I^{\parallel} - np}{\tau_p (n + n_I) + \tau_n (p + p_I)} \quad (3-35)$$

حيث :

$$n_I \equiv n_I \exp(E_I / kT) \quad (3-36-a)$$

$$p_I \equiv n_I \exp(E_I - E_V) / kT \quad (3-36-b)$$

ومستترك للقارئ البرهنة على أن المعادلتين (3-35) تتحول إلى المعادلتين (3-34) فى حالة الحقن المنخفض المستوى.

٤-٣-٢ أعمار الحاملات الأقلية Minority Carrier Lifetimes

معلومات عامة

عرفنا الثابتين τ_n و τ_p فى المعادلتين (3-34) دون تعليق لكن من الواضح أن لهما أهمية فى التعرف على مدى سرعة فعل الالتئام - التوليد.

لنعد مرة أخرى للشكل (٣-٢١) للتعرف على هذين الثابتين بصورة أفضل. عند $t = 0$ بدأنا بعدد معين من الشغرات. هذا العدد لا يفنى كله دفعة واحدة، فبعضها

يتعرض للفناء المبكر، والبعض الآخر قد يبقى نسبيا لعمر أطول قبل الالتئام بالكترون. وإذا كان الالتئام - التوليد الحراريين هما العمليتان الوحيدتان الموجودتان فيمكن عندئذ حساب متوسط عمر الشغرات بطريقة سهلة وبمباشرة، وبدون الدخول في التفاصيل فإن العمر المتوسط للشغرات سنجد أنه τ_p في المادة من النوع n كما أن متوسط عمر الإلكترونات هو τ_n في المادة من النوع p . وبالتالي يمكننا أن نعتبر كلا من τ_p أو τ_n متوسطا لعمر الحاملات الأقلية التي تعيش في بحر من الحاملات الأغلبية. من الطبيعي أن نطلق على هذين الثابتين τ_p و τ_n أعمار الحاملات الأقلية.

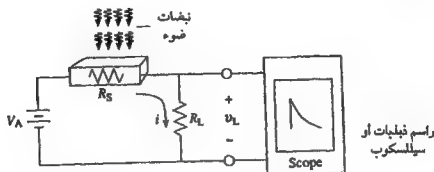
ومثل الثوابت μ , D , يعتبر τ ثابتا هاما لتمييز وسائط (بارامترات) المواد التي لا بد من معرفتها أثناء نمذجة النباائط. لكن خلافا للثوابت μ و D فلا توجد سوى منحنيات وجداول قليلة تسجل قيم τ التي تُستخدم لزوم نمذجة نبيطة ما، في الحقيقة لا بد من إجراء قياسات معمّلة - سيجي - ذكرها - لتحديد عمر الحاملات الأقلية لعينة معطاة من شبه الموصل. والسبب في عدم توفر هذه الجداول أو المنحنيات يمكن نسبته للتغاير الكبير للوسائط τ_p و τ_n . فكما رأينا في المعادلتين (3-33) فإن هذين الوسيطين يرتبطان ارتباطا وثيقا بعدد المراكز $R-G$ (N_T) وللأسف فإن إمكانية التحكم في دقة قيمة (N_T) أثناء تصنيع شبه الموصل تعتبر أقل بكثير بالقياس مثلا بإمكانية التحكم في تركزات الإشابة (N_D أو N_A). وليست المشكلة فقط في دقة N_T ولكن في طبيعة عمل المراكز $R-G$ المهيمنة على الالتئام التوليد حيث يمكن أن تتغير من موضع إلى آخر داخل العينة المفردة أثناء تصنيع النباائط. توجد طريقة تصنيع تسمى بالاستئصال $gettering$ تستطيع الإقلال من تركيز المراكز $R-G$ لحدود دنيا مما يجعل الثابت الزمني كبيرا جدا (حوالي ١ ميللي ثانية في السيليكون) ومن ناحية أخرى يمكن بإدخال ذرات من الذهب بفرض زيادة مراكز $R-G$ أن نصل بالثابت الزمني إلى واحد نانوثانية. يقع عمر الحاملات الأقلية في السيليكون عادة بين هاتين القيمتين أي:

$$10^{-9} \text{ sec} < \tau < 10^{-3} \text{ sec}$$

قياس العمر :

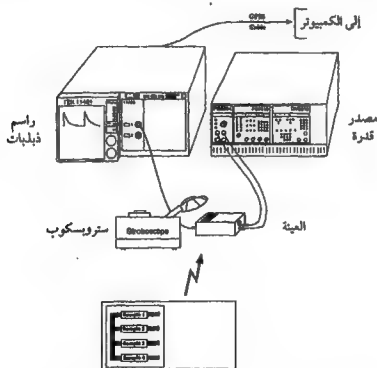
يمكن استخدام طرق متعددة لقياس الثابت الزمني. في غالبية هذه الطرق تقاس ميزات تركيبات أو نبائط معينة وبمقارنة الميزات المقاسة بتلك المحسوبة نظريا يمكن الحصول على عمر الحاملة. الطريقة التي نوردنا هنا تستعمل عينة من شبه الموصل على شكل قضيب مع نقاط تلامس أومية عند طرفيه. إذا تلامس معدن مع شبه الموصل غالبا ما نحصل على نقطة تلامس غير أومية أي علاقة الجهد والتيار تختلف باختلاف اتجاه التيار. وللتغلب على هذه المشكلة نزيد الإشابة بدرجة كبيرة (أي تضاف كثير من

المانحات لشبه الموصل من النوع n أو كثير من المتقبلات للنوع p لشبه الموصل عند نقاط تلامسه مع المعدن فتحصل على نقطة تلامس أومية. يتم توصيل العينة كما بالشكل (٢٢-٣).



شكل (٢٢-٣) مخطط لتوضيح قياس اضمحلال التوصيلية الضوئية باستخدام راسم الفلبجات الكهربي (CRO)

وتسمى هذه الطريقة بطريقة التوصيل الضوئي وفيها يتم تعريض العينة لنضبات من الضوء، ناتجة عن جهاز سترويسكوب انظر الشكل (٢٣-٣) كل نبضة ضوء تنتج زيادة في الحاملات. وما إن تنتهى نبضة الضوء يعمل الالتئام على إزالة هذه الزيادة،



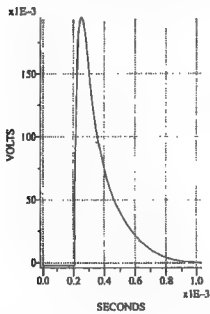
شكل (٢٣-٣) نظام قياس اضمحلال التوصيلية الضوئية باستخدام كمبيوتر

وحيث إن التوصيلية الكهربائية تتناسب مع عدد الحاملات، فإنها تتغير مع الزمن. ومن تغير التوصيلية يمكن استنباط قيمة τ باستخدام راسم الذبذبات الكهربي (CRO)، شكل (٢٢-٣) وفي الأجهزة التجارية باستخدام كمبيوتر، الشكل (٢٣-٣).

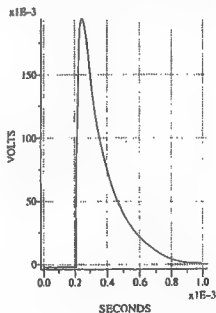
في الشكل (٢٢-٣) R_p هي مقاومة العينة و R_L هي مقاومة الحمل، الجهد V_A هو جهد مستمر على كل من R_p و R_L بينما V_L هو الجهد العابر (transient) على مقاومة الحمل. وبدون الدخول في تفاصيل القياس سنجد أنه في حالة الحقن المنخفض المستوى أن V_L عبارة عن جزئين :

$$V_L = V_{DC} + V_{AC} e^{-t/\tau} \quad (3-37)$$

الجزء V_{DC} هو الجزء المستمر المناظر للظلام المستمر، V_{AC} هو أقصى تغير عابر بعد بدء نبضة ضوء جديدة و τ هو عمر الحاملات الأقلية لشبه الموصل. بإدخال V_L على راسم ذبذبات كهربي أو كمبيوتر يمكن تحديد τ الشكل (٢٤-٣) يوضح التغير مع الزمن للجزء العابر بتلويح رأسى خطى بينما الشكل (٢٤-٣) ب) بتلويح رأسى لوغاريتمى، وهذا الشكل الأخير مناسب تماما للتغير العابر من النوع المشار إليه في المعادلة (3-37)، إذ إن الجزء النازل تقريبا خط مستقيم ميله $-\frac{1}{\tau}$ مباشرة.



(ب)



(١)

شكل (٢٤-٣) رد الفعل العابر للتوصيلية الضوئية. الجزء المتغير مع الزمن لفرق الجهد V_L (بالمللي فولت) مرسوم على المحور الرأسى كدالة للزمن (بالمللي ثانية) على المحور الأفقى
١ - تمثيل بياني خطى، ب- تمثيل بياني نصف لوغاريتمى

(٤-٣) معادلات الحالة Equations of State

فى الأقسام الثلاثة الأولى من هذا الفصل تفحصنا ثلاثة أنواع منفصلة من فاعليات الحاملات وقمنا بنمذجتها كل على حدة. لكن فى شبه الموصل الحقيقى تحدث هذه الفاعليات فى آن واحد، ولكى نتعرف على حالة شبه الموصل يجب أن نأخذ فى الحسبان التأثير المركب لكل هذه الفاعليات المنفردة. وعندما تأخذ كل الاعتبارات معا فإننا نحصل على مجموعة أساسية من المعادلات الأولية نبدأ بها عند حل مسائل النبائط. سنسمى هذه المعادلات بمعادلات الحالة. فى هذا القسم سنبدأ باستنباط معادلات الحالة هذه. وفى باقى هذا القسم سنوِجِز بعض التبسيطات الشائعة وقائمة بحلول حالات خاصة وأمثلة.

١-٤-٣ معادلات الاتصال Continuity Equations

جميع فاعليات الحاملات من انسياق، انتشار، التثام - توليد مباشر أو غير مباشر، أو أى نوع آخر من الفاعليات، لا بد وأن تؤدي جميعها إلى تغيير فى تركيز الحاملات مع الزمن. ومجموع كل معدلات التغير الزمنى للفاعليات المنفصلة يعطى المعدل الكلى $\frac{\partial n}{\partial t}$ و $\frac{\partial p}{\partial t}$.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{\text{drift}} + \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{\text{diff}} + \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{\text{thermal, R-G}} + \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{\text{other}} \quad (3-38-a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{\text{drift}} + \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{\text{diff}} + \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{\text{thermal, R-G}} + \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{\text{other}} \quad (3-38-b)$$

حيث الطرف الأيسر يعبر عن معدل التغير الإجمالى، باقى الرموز واضحة وكلمة other تشير لباقى عمليات الالتئام - التوليد ما عدا الحرارية R-G أى مثل تلك الناجمة عن الضوء وخلافه.

لنبدأ يبحث معدلات التغير فى تركيز الحاملات الناجمة عن التغير الموضعى فى تيارى الانسياق والانتشار.

نفترض وجود تيار اصطلاحى فى الاتجاه الموجب x ودعونا نراقب ماذا يحدث لعدد الشغرات المتواجدة بين وجهى شريحة مساحة مقطعها A ، وطرفاها عند الموضعين x ، $x + \Delta x$ ومتعامدان على اتجاه التيار. وسنفترض أن تغير التركيز ناتج فقط عن تغير التيار مع الموضع خلال فترة زمنية مقدارها Δt .

عدد الشغرات التى تدخل عند x هى $A J_p(x) \Delta t / q$ ، وعدد الشغرات التى

تخرج عند $x + \Delta x$ هي $A J_p (x + \Delta x) \Delta t / q$ ، ونظرا لأن هذين العددين غير متساويين بصفة عامة فسيحدث تغير في عدد الشغرات مقداره (التغير في التركيز Δp) مضروبا في (الحجم $A \Delta x$) أى بمقدار $A \Delta x \Delta p$. وبما أن :

$$\text{التغير} = \text{العدد الداخـل} - \text{العدد الخارج} ، \quad \text{إذن :} \\ A \Delta x \Delta p = \frac{\Delta J_p (x) \Delta t}{q} - \frac{\Delta J_p (x + \Delta x) \Delta t}{q} \quad (3-39)$$

أو

$$\frac{1}{q} \frac{J_p (x + \Delta x) - J_p (x)}{\Delta x} - \frac{\Delta p}{\Delta t} = 0 \quad (3-40)$$

وعندما نقول Δx ، Δt للصفر نجد أن :

$$\frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (3-41)$$

طبعاً لجأنا للتفاضلات الجزئية لأن الكميات p ، J هنا دالة في المتغيرين المستقلين x و t أى أن :

$$p \equiv p(x, y) , J \equiv J(x, y) \quad (3-42-a)$$

في الحقيقة يجب أن نعمم الموضع من البعد الاحادى (x) إلى الأبعاد الثلاثة (x, y, z) ، وبالتالي :

$$p \equiv p(x, y, z, t) , J_p \equiv J_p(x, y, z, t) \quad (3-42-b)$$

$$\frac{\partial J_p}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial J_p}{\partial x} + \frac{\partial J_p}{\partial y} + \frac{\partial J_p}{\partial z} = \nabla \cdot J_p \quad (3-43)$$

هنا هي نتاج $\frac{\partial p}{\partial t}$ للانتشار معاً أى :

$$\frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{\text{diff}} + \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{\text{diff}} = - \frac{1}{q} \nabla \cdot J_p \quad (3-44)$$

طبعاً عندما يكون الاتجاه الاصطلاحي موجبا فإن دخول الإلكترونات سيكون من الوجه $x+\Delta x$ وستخرج من الوجه الذى عند x بسبب شحنة الإلكترون السالبة وتكون النتيجة مشابهة للمعادلة (3-44) بعد إزالة إشارة السالب، أى :

$$\frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{\text{diff}} + \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{\text{diff}} = \frac{1}{q} \nabla \cdot J_N \quad (3-45)$$

من المعادلات (3-38)، (3-44)، (3-45) نصل إلى :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot J_N + \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{\text{thermal } R-G} + \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{\text{other}} \quad (3-46-a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{1}{q} \nabla \cdot J_p + \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{\text{thermal } R-G} + \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{\text{other}} \quad (3-46-b)$$

معادلتا الاتصال (3-46) تعتبر عامة تماماً وتؤخذ كما هى أو فى شكل غير مباشر كنقطة البداية عند تحليل عمل معظم النقاط. فى الحالات التى يتم حل معادلتى الاتصال بالطريق العددية باستخدام الكمبيوتر تؤخذ المعادلات (4-46) كما هى بعد التعويض عن الحدود $\frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{\text{thermal } R-G}$ و $\frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{\text{thermal } R-G}$ بواسطة المعادلات (3-34) [أو غالباً بمعادلات أعم من المعادلات (3-34)]. ولحسب الدوال $n(x, y, z, t)$ و $p(x, y, z, t)$ عددياً. أما إذا أردنا حلولاً غير عددية أى فى صورة تعبيرات رياضية مكتملة closed-form فعادة ما تستخدم صورة مبسطة من معادلتى الاتصال وهذا ما سوف نفضله فى الجزء التالى.

٢-٤-٣ معادلات انتشار الحاملات الأقلية

Minority Carrier Diffusion Equations

كما أشرنا قبل قليل إذا كان المطلوب هو حلول تحليلية مكتملة فإن عبء العمل سيقع على معادلات تسمى بمعادلات انتشار حاملات الأقلية. ويمكن اشتقاق هذه المعادلات من معادلات الاتصال عن طريق اتباع الافتراضات التبسيطية التالية:

- ١- يتم اختزال الثلاثة أبعاد إلى بعد واحد: «x» مثلا.
 - ٢- يقتصر التحليل على الحاملات الأقلية فقط.
 - ٣- المجال الكهربى صغير بحيث يمكن إهماله : $E \approx 0$.
 - ٤- تركيزات الاتزان ليست دالة فى الموضع أى أنها ثابتة $n_o = \text{const}$ ، $p_o = \text{const}$.
 - ٥- تحقيق شرط الحقن منخفض المستوى.
 - ٦- الالتئام - التوليد الحرارى غير المباشر هو المهيمن.
 - ٧- عمليات الالتئام - التوليد المشار إليها بكلمة other غير موجودة باستثناء التوليد الضوئى.
- وتؤدى بنا قائمة الافتراضات السابقة إلى سلسلة من التبسيطات لمعادلات الاتصال.
- فأولا اختزال الأمور إلى بعد واحد يؤدى إلى:

$$\frac{1}{q} \nabla \cdot J_N \rightarrow \frac{1}{q} \frac{\partial J_N}{\partial x} \quad (3-47)$$

كذلك إهمال المجال الكهربى يجعل الانسياق قليل الأهمية بالنسبة للحاملات الأقلية (مثلا n صغيرة فى مادة من النوع p).

$$J_N = q\mu_n nE + qD_N \frac{\partial n}{\partial x} \approx qD_N \frac{\partial n}{\partial x} \quad (3-48)$$

أهملنا حد الانسياق الذى يحتوى على nE ؛ لأن $E \approx 0$ ، وكذلك n مهمة لكونها تركيز الأقلية (لهذا افترضنا التبسيط رقم 2 فى القائمة السابقة)، وبما أن $n_o = \text{const}$ (تبسيط رقم ٤)، وحيث إن $n = n_o + \Delta n$ إذن :

$$\frac{\partial n}{\partial x} = \frac{\partial n_o}{\partial x} + \frac{\partial \Delta n}{\partial x} = \frac{\partial \Delta n}{\partial x} \quad (3-49)$$

بدمج المعادلتين (3-47)، و(3-49) نحصل على :

$$\frac{1}{q} \nabla \cdot J_N \rightarrow D_N \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2} \quad (3-50)$$

بالنسبة لباقي حدود معادلة الاتصال للإلكترونات وعملا بالافتراض (٦) أو هيمنة عملية الالتئام - التوليد عن طريق المراكز R-G على باقي العمليات وأخذ بالافتراض (٥)، وهو تحقيق الحقن المنخفض المستوى نصل إلى:

$$\left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{\text{thermal R-G}} = - \frac{\Delta n}{\tau_n} \quad (3-51)$$

ومن الغرض (٧) فإن :

$$\left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{\text{other}} = G_L \quad (3-52)$$

وطبعا $G_L=0$ إذا لم يتعرض شبه الموصل للضوء، وأخيرا بالنسبة للحد $\frac{\partial n}{\partial t}$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial (n_o + \Delta n)}{\partial t} = \frac{\partial \Delta n}{\partial t} \quad (3-53)$$

بالتعويض من المعادلات (3-50) حتى (3-53) في معادلة الاتصال (3-46-a) نحصل على :

$$\boxed{\begin{aligned} \frac{\partial \Delta n_p}{\partial t} &= D_N \frac{\partial^2 \Delta n_p}{\partial x^2} - \frac{\Delta n_p}{\tau_n} + G_L \\ \frac{\partial \Delta p_n}{\partial t} &= D_P \frac{\partial^2 \Delta p_n}{\partial x^2} - \frac{\Delta p_n}{\tau_p} + G_L \end{aligned}} \quad \begin{array}{l} \text{معادلات انتشار حاملات الاقلية} \\ \text{معادلات انتشار حاملات الاقلية} \end{array} \quad \begin{array}{l} (3-54-a) \\ (3-54-b) \end{array}$$

وضعنا الدليل السفلى في رموز التركيزات (p_n ، n_p) لنذكر أنفسنا أننا هنا نتعامل فقط مع الحاملات الاقلية أى الإلكترونات فى المواد من النوع p والشغرات فى المواد من النوع n .

٣-٤-٢ حالات خاصة - تبسيطات - حلول

عند إجراء تحليل للنسيطة نجد أن ظروف المسألة تسمح بتبسيطات إضافية تجعل إيجاد الحلول لمعادلة انتشار حاملات الاقلية أمرا ميسورا. فى الجدول التالى نذكر بعض التبسيطات الشائعة ونتائجها.

جدول (١-٣)

النتيجة	التبسيط
$\frac{\partial \Delta n_p}{\partial t} \rightarrow 0 \quad \left(\frac{\partial \Delta p_n}{\partial t} \rightarrow 0 \right)$	حالة الاستقرار
$D_N \frac{\partial^2 \Delta n_p}{\partial x^2} \rightarrow 0 \quad \left(D_p \frac{\partial^2 \Delta p_n}{\partial x^2} \rightarrow 0 \right)$	عدم تغير التركيزات مع الموضع أو عدم وجود انتشار
لا جليد فهذا أحد افتراضات معادلة انتشار الأقلية	عدم وجود انسياب أو مجال كهربي $E=0$
$\frac{\Delta n_p}{\tau_n} \rightarrow 0 \quad \left(\frac{\Delta p_n}{\tau_p} \rightarrow 0 \right)$	إهمال الانتماء - التوليد الحراري $R-G$
$G_L \rightarrow 0$	عدم وجود ضوء

ويعد كتابة معادلة انتشار الأقلية التي تم تبسيطها باستخدام جدول (١-٣) (١-٣) نكتب الحلول مستعينين بالجدول (٢-٣) الثابتان A ، B يتحددان من ظروف المسألة.

جدول (٢-٣)

الحل $\Delta n_p =$	المعادلة المبسطة	معطيات	م
$\Delta n_p = A e^{-x/L_n} + B e^{x/L_n}$ $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$ حيث	$D_N \frac{d^2 \Delta n_p}{dx^2} - \frac{\Delta n_p}{\tau_n} = 0$	حالة الاستقرار ولا يوجد ضوء	١
$\Delta n_p(0) e^{-x/L_n}$	$\frac{d \Delta n_p}{dt} = - \frac{\Delta n_p}{\tau_n}$	التركيز منتظم ولا يوجد ضوء	٢
$G_L \tau_n$	$-\frac{\Delta n_p}{\tau_n} + G_L = 0$	حالة الاستقرار ولا يوجد ضوء	٣

تابع جدول (٢-٣)

م	معطيات	المعادلة المبسطة	الحل $\Delta n_p =$
٤	حالة مستقرة ولا يوجد ضوء	$D_n \frac{d^2 \Delta n_p}{dx^2} = 0$ أى : $\frac{d^2 \Delta n_p}{dx^2} = 0$	$A + Bx$

فى جدول (٢-٣) الثابت $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$ يسمى طول الانتشار ولاهيته ستتكم عنه لاحقا .

الكمية $\Delta n_p(0)$ هى الزيادة فى عدد الإلكترونات عند الزمن $t=0$ ، لاحظ أن هذا الجدول اختص بالإلكترونات فى مادة من النوع p ، أما بالنسبة للشغرات فى مادة من النوع n فنستخدم نفس الجدول (٢-٣) بعد تغيير كل من n إلى p وكل p إلى n .

٤-٤-٢ حل المسائل Problem Solving

يعتبر كل تحليل لعمل النبائط مثالا على استخدام الجدولين السابقين. وسنكتفى هنا بمثالين شائعين. وهذان المثالان سيمهدان الطريق لعرض مفهومين هامين نتعرض لهما فى نهاية الفصل.

مثال ٤-٣ :

رقاقة سيليكون مشابة بانتظام بتركيز شوائب $N_D = 10^{15}/\text{cm}^3$ ودرجة الحرارة $T = 300 \text{ K}$. عند الزمن $t=0$ تعرضت الرقاقة لضوء مفاجئ ولد 10^{17} زوج إلكترون - شغرة لكل cm^3 لكل ثانية. فإذا كان عمر الأقلية $\tau_p = 10^{-6} \text{ sec}$ عين $\Delta p_n(t)$ للزمن $t > 0$.

الحل :

الخطوة (١) :

راجع بدقة معطيات المسألة ومضامينها :

شبه الموصل هو السيليكون، $T = 300 \text{ K}$ ، الإشابة منتظمة $N_D = 10^{15}/\text{cm}^3$ ،

و $G_L = 10^{17} / \text{cm}^3 \cdot \text{sec}$ بانتظام لكل النقط داخل شبه الموصل. أيضا صيغة المسألة تتضمن حالة اتزان عند $t < 0$.

الخطوة (٢) :

حدد بيانات النظام فى حالة الاتزان :

فى السيليكون عند درجة حرارة الغرفة $n_i = 10^{10} / \text{cm}^3$ ، وبما أن $N_D \gg n_i$

$$\therefore n_o = N_D = 10^{15} / \text{cm}^3 \text{ ، وأيضاً : } p_o = n_i^2 / N_D = 10^5 / \text{cm}^3$$

الإشابة المنتظمة تعنى أن n_o و p_o لا يتغيران مع الموضع.

الخطوة (٣) :

حلل المسألة كىفياً :

* قبل $t < 0$ كان النظام متزاناً : $\Delta p_n = 0$.

* عند $t = 0$ يولد الضوء المستمر المزيد والمزيد من الإلكترونات والشفرات. أما الإلكترونات فليست من الأهمية بمكان؛ لأنها الأغلبية (تركيز الأغلبية لا يتغير كثيراً بالحقن المنخفض المستوى).

* وينصب تركيزنا على الشفرات، التى تبدو أنها ستزيد باطراد مع الزمن بسبب التوليد الضوئى. إلا أن معدل التغير $\frac{\partial \Delta p_n}{\partial t}$ سيتناقص بسبب الالتئام الذى يتناسب مع Δp_n نفسها. وسنصل إلى نقطة حيث ستوقف Δp_n عن النمو عندما يتساوى معدل التوليد الضوئى G_L مع معدل الالتئام $\frac{\Delta p_n}{\tau_p}$ وسنصل إلى أعلى قيمة $\Delta p_{n \max} = \tau_p G_L$.

الخطوة (٤) :

حلل المسألة كميًا:

عادة ما نبدأ من معادلة انتشار الحاملات الأقلية. بعد التأكد من عدم وجود ظروف تتعارض مع فرضيات هذه المعادلة نشرع فى كتابتها.

نبسط المعادلة (انظر بالجدول ٣-١) ثم نكتب الحلول كالموضحة بالجدول (٣-٢).

بفحص سريع للمسألة التى بين أيدينا ننتبين أن الشروط التى تفترضها معادلة الانتشار متحققة هنا. بالتحديد فإننا سنقتصر على الحاملات الأقلية، تركيزات الاتزان للحاملات لا تعتمد على الموضع، الالتئام - التوليد من النوع الحارارى $R-G$ هو السائد

فى السيليكون، ولا توجد عمليات توليد أخرى سوى التوليد الضوئى . وبما أن شدة الإضاءة منتظمة داخل العينة، بالتالى فإن الحاملات الإضافية المتولدة أيضا يكون لها تركيز منتظم أى لا يعتمد على الموضع داخل العينة . وبالتالى لن يوجد مجال كهربى مبيت وأخيرا أقصى تغيير فى تركيز الشغرات $n_p \ll 10^{11} / \text{cm}^3 = G_L \tau_p = \Delta p_{n/\text{max}}$ أى أن الحقن منخفض المستوى طوال الوقت .

فى ظل عدم وجود عوائق أمام استخدام معادلة الانتشار نستطيع أن نجد الحل الكمى بحل المعادلة :

$$\frac{\partial \Delta p_n}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 \Delta p_n}{\partial x^2} - \frac{\Delta p_n}{\tau_p} + G_L \quad (3-55)$$

بالشرط الابتدائى :

$$\Delta p_n(t) |_{t=0} = 0 \quad (3-56)$$

وبما أن Δp_n لا تتغير مع الموضع، نسقط الحد $\frac{\partial^2 \Delta p_n}{\partial x^2}$ وتصبح معادلة الانتشار :

$$\frac{d \Delta p_n}{dt} + \frac{\Delta p_n}{\tau_p} = G_L \quad (3-57)$$

حل المعادلة (3-57) هو :

$$\Delta p_n(t) = G_L \tau_p + A e^{-t/\tau_p} \quad (3-58)$$

من الشرط الابتدائى : $\Delta p_n(0) = 0$ ينتج أن :

$$A = - G_L \tau_p \quad (3-59)$$

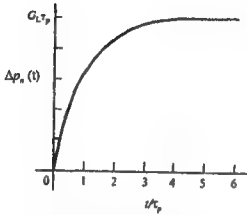
وبالتالى الحل المطلوب :

$$\Delta p_n(t) = G_L \tau_p (1 - e^{-t/\tau_p}) \quad (3-60)$$

الخطوة (٥):

افحص الحل :

عدم تفحص الحل يبدو كمن تكبد المشقة لزراعة صنف من الفاكهة ثم لم يتذوق ثمار ما زرعه. بما أن وحدات $G_L \tau_p$ هي cm^3 إذن الحل سليم من ناحية الأبعاد على الأقل. إذا رسم $\Delta p_n(t)$ كدالة في الزمن t (انظر الشكل 25) نجد أن $\Delta p_n(t)$ يرتفع سريعا في البداية ثم لا يلبث أن يتشبع للقيمة $G_L \tau_p$ عندما يتول الزمن لما لا نهاية. في الواقع سيظل $\Delta p_n(t)$ قريبا جدا من القيم العظمى $G_L \tau_p$ بعد عدد ستة أزمنة عمر [عند $t = 6 \tau_p$ يصل $\Delta p_n(t)$ إلى $0.998 G_L \tau_p$].

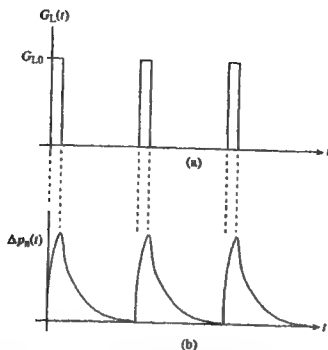


شكل (٣-٢٥) حل مثال (٤)
الزيادة في التركيز الإشعاعي للشفرات (الناجمة
عن التوليد الضوئي)
كدالة في الزمن

أخيرا من المناسب هنا أن نذكر القارئ بتجربة قياس العمر لشبه الموصل لارتباطها بالحل (3-58) أعلاه. على الأخص في فترة وجود نبضة الضوء يتغير $\Delta p_n(t)$ حسب العلاقة (3-60) ولكن نبضة الضوء لا تدوم أكثر من $1 \mu\text{sec}$ تقريبا بينما عمر الحاملة في حدود $150 \mu\text{sec}$. بالتالي نرى فقط جزءا صغيرا من المنحنى في شكل (٣-٢٦) ثم ينقطع الضوء فتصبح $G_L = 0$ ، وعندئذ نجد أن (3-58) تعطي :

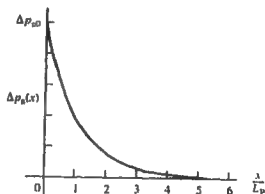
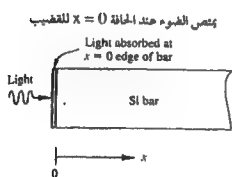
$$\Delta p_n(t) = \Delta p_n(0) e^{-t/\tau_p}$$

حيث $t = 0$ هنا هو لحظة انقطاع الضوء ونظرا لأن انقطاع الضوء يستغرق زمن عدة أعمار حاملة فإن $\Delta p_n(t)$ يجد الوقت الكافي للاضمحلال بقرب الصفر ثم تتكرر هذه العملية مرة أخرى في الشكل (٣-٢٦) يوضح التوليد الضوئي مع الزمن والشكل (٣-٢٦) ب) يعطي تغير $\Delta p_n(t)$ مع الزمن كما أسلفنا.



شكل (٣-٢٦)

- أ - نموذج مبسط للضوء الناتج عن سترويسكوب في تجربة قياس اضمحلال التوصيلية الضوئية.
 ب - مخطط للحلّين - الناظرين للضوء والإفلام - لتركيز الحاصلات الأقلية الزائدة.



شكل (٣-٢٧)

- ١ - تعريف بالرسم للمثال (٣-٥). ب - حل المثال (٣-٥) موضحة تغير تركيز الشواغر الزائدة داخل قضيب سيليكون كثافة في الموضع المطبق x/L_p .

مثال ۳-۵ :

يبين الشكل (٣-٢٧) قضيباً من السيليكون شبه لا نهائياً يمتد من $x=0$ حتى $x \rightarrow \infty$ ومشاب بتركيز منتظم $N_D = 10^{15} / \text{cm}^3$ تضاء العينة من ناحية الطرف $x=0$ حيث تتولد $\Delta p_n = 10^{10} / \text{cm}^3$ شغرة إضافية. عند الطول الموجي للضوء المستخدم يحدث امتصاص كلي للضوء عند السطح $x=0$ ولا يوجد ضوء بالداخل ($x>0$). احسب $\Delta p_n(x)$.

الحل :

هنا أيضا شبه الموصل منتظم الإشابة.

شبه الموصل في حالة استقرار ويمكن استنباط ذلك من رأس المسألة حيث المطلوب هو $\Delta p_n(x)$ وليس $\Delta p_n(x,t)$. الشروط المحيطية هي: $\Delta p_n(0) = \Delta p_{nQ} = 10^{10}/\text{cm}^3$ ، أيضا $\Delta p_n(x) \rightarrow 0$ عندما $x \rightarrow \infty$ (طبعاً x تتول لما لا نهاية هي نقطة داخل شبه الموصل؛ لأن القضيب لا نهائي) والسبب في ذلك أنه عند هذا العمق مستزول القلقلّة الناتجة عن الضوء السطحي، وبالتالي $\Delta p_n \rightarrow 0$.

أخيرا لم يذكر رأس السؤال درجة الحرارة، في هذه الحالة نفترض أنها درجة حرارة الغرفة $T = 300 \text{ K}$.

طبعاً إذا أطفئ الضوء في هذه المسألة ويعد حدوث الاستقرار - كما وصفنا بالمثال السابق - سنحصل لقيم الايزان $n_o = N_D = 10^{15} / \text{cm}^2$, $p_o = n_i^2 / n_o = 10^5 / \text{cm}^3$, ويصير تركيز الحاملات منتظماً.

لننظر الآن كيفي لما سيحدث نتيجة عدم نفاذ الضوء إلى داخل قضيب السيليكون. الضوء سيولد حاملات إضافية عند $x=0$. بسبب هذه الزيادة سيحدث انتشار للحاملات إلى الداخل كذلك فإن ظهور شغرات إضافية سيحفز الالتصاق الحراري، وبما أن عمر الشغرات محدود ويساوي τ_p بالمتوسط، نتوقع انضمامها في أعداد الشغرات الإضافية كلما توغلنا لعمق شبه الموصل. وبينما تكون $\Delta p_n(x)$ أكبر ما يمكن عند $x=0$ فإنها ستؤول للصفر عند $x \rightarrow \infty$.

من أجل الوصول للحل الكمي علينا أن نلاحظ أن النظام قيد البحث أحادي البعد وأن التحليل مقصور على الحاملات الاقلية (الشغرات في هذه الحالة)، تركيزات n_0 غير معتمدة على الموضع، الالتئام - التوليد الحرارى $R-G$ هو المهيمن، ولا توجد عمليات أخرى داخل شبه الموصل أى عند $x > 0$ وتسود ظروف الحقن المنخفض المستوى؛ لأن $n_0 = 10^{15} / \text{cm}^3 \ll \Delta p_{\text{max}} = \Delta p_{\text{eq}} = 10^{10} / \text{cm}^3$.

التساؤل الوحيد حول تحقق فرضيات معادلة الانتشار هو: هل $\mathcal{E} = 0$ ؟ بالرغم من وجود تدرج في $\Delta p_n(x)$ بالتناقص كلما رادت x ، الحقيقة أن Δp_{no} صغيرة ($\Delta p_{no} = 10^{10}/\text{cm}^2 = n_i$)، بحيث إن المجال المبيت لن يكون كبيرا. بالإضافة إلى أن عادة الحاملات الأغلبية (الإلكترونات) تعيد توزيع نفسها بحيث تلغي تأثير المجال المبيت بدرجة كبيرة. الافتراض أن $\mathcal{E} = 0$ في هذه المسألة يعتبر افتراضا واقعيا.

عند $x > 0$ ، $G_L = 0$ ، وبالتالي معادلة انتشار الشغرات تختزل إلى :

$$D_p \frac{d^2 \Delta p_n}{dx^2} - \frac{\Delta p_n}{\tau_p} = 0 \quad , \quad x > 0 \quad (3-62)$$

بالشروط المحيطة :

$$\Delta p_n(x=0) = \Delta p_{no} \quad (3-63)$$

$$\Delta p_n(x \rightarrow \infty) = 0 \quad (3-64)$$

من الجدول (٣-٢) نستطيع أن نكتب حل (3-62) :

$$\Delta p_n(x) = A e^{-x/L_p} + B e^{x/L_p} \quad (3-65)$$

حيث :

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (3-66)$$

من الشرط (3-64) أي $\Delta p_n(x \rightarrow \infty) = 0$ يتبع أن $B = 0$ ومن الشرط (3-63) نجد أن :

$$A = \Delta p_{no} \quad (3-67)$$

أي أن :

$$\Delta p_n(x) = \Delta p_{no} e^{-x/L_p} \quad (3-68)$$

الحل الناتج مرسوم بالشكل (٣-٢٧ ب) ويحقق ما سبق أن توقعناه من أن $\Delta p_n(x)$ ستضمحل كلما زادت x وحتى تصل إلى الصفر عند $x \rightarrow \infty$. ويميز هبوط $\Delta p_n(x)$ طول مميز هو L_p .

(٥-٢) مفاهيم إضافية Supplemental Concepts

٢-٥-١ أطوال الانتشار Diffusion Lengths

شاهدنا في المثال السابق أن توليد حاملات أقلية إضافية عند نقاط مستوى معين في شبه الموصل يصاحبه انتشار لهذه الحاملات مع هبوط أسى في عدد الحاملات الإضافية مع زيادة المسافة من هذا المستوى. ويتميز هذا الهبوط بطول اضمحلال (L_p). هذا الطول يأخذ اسم طول انتشار الحاملات الأقلية ويعطى بالعلاقتين :

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (3-99-a)$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (3-99-b)$$

تعنى الكمية L_p (أو L_n) فيزيائيا، المسافة التي تنتشر خلالها الحاملات الأقلية ويقل فيها التركيز إلى $\frac{1}{e}$ من قيمته الأصلية. ولتقريب ذلك؛ تخيل أفواجا من الظباء تحاول اختراق غابة مليئة بالحيوانات المفترسة. طبقي أن أعداد الظباء الناجية من الافتراس ستقل كلما توغلت أكثر فأكثر داخل هذه الغابة، ولنا أن نعرف طول انتشار متوسط L على أنه المسافة المتوسطة التي يستطيع ظبي أن يجتازها قبل أن يفترس.

ولنحاول الآن تقدير قيمة طول الانتشار في السيليكون عند $T = 300 \text{ K}$ ، $N_D = 10^{15} / \text{cm}^3$ بالتالي $\mu_p = 458 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{sec}$ ونفترض أن $\tau_p = 10^{-6} \text{ sec}$. إذن :

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = \sqrt{(kT/q) \mu_p \tau_p} = \sqrt{(0.0259) (458) (10^{-6})}$$

$$= 3.44 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

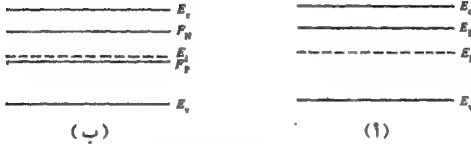
وتتغير قيم أطوال الانتشار تغيرا واسعا بسبب التغير الواسع في قيم العمر τ كما ذكرنا آنفا.

٣-٥-٢ أشباه مستوى فرمى Quasi - Fermi Levels

تستخدم أشباه مستويات فرمى لتحديد تركيزات الحاملات داخل شبه الموصل فى حالة عدم الاتزان. لفهم الحاجة لهذا المفهوم نعود للمثال (٣-٤). قبل $t = 0$ كان شبه الموصل فى حالة اتزان، وبالتالي تكون $n_0 = N_D = 10^{15}/\text{cm}^3$ و $p_0 = 10^5/\text{cm}^3$. يوضح الشكل (٣-٢٨) مخطط نطاق الطاقة لحالة الاتزان. بالفحص السريع للمخطط وموضع مستوى فرمى يوحى بتركيزات الاتزان للحاملات؛ لأن :

$$n_0 = n_i e^{(E_F - E_i)/kT} \quad (3-71-a)$$

$$p_0 = n_i e^{(E_i - E_F)/kT} \quad (3-71-b)$$



شكل (٣-٢٨) مثال لاستخدام لشبهى مستوى فرمى. وصف نطاق الطاقة للوضع داخل شبه الموصل بالمثال ١ تحت ظروف
١- الاتزان، وب- علم الاتزان ($t > \tau_p$)

. النقطة التى نؤكددها هنا أنه عند ظروف الاتزان يوجد تناظر واحد لواحد بين موضع مستوى فرمى وبين تركيزات الحاملات. إذا عرفنا E_F سنحدد n_0 ، p_0 والعكس بالعكس.

دعونا نذهب الآن للوضع غير المتزن (لكنه مستقر زمنيا) فى المثال (٣-٤) عندما $t > \tau_p$ ، $\Delta p = G_L \tau_p = 10^{11}/\text{cm}^3$ ، بالتالى $p = p_0 + \Delta p \approx 10^{11}/\text{cm}^3$ بينما $n = n_0 = 10^{15}/\text{cm}^3$. أى أن n تظل كما هى بينما تزداد p بعدة رتب مقدارا وبالتالى الشكل (٣-٢٨) لن يصلح لوصف هذه الحالة وفى الحقيقة يعرف مستوى فرمى فقط للنظم فى حالة اتزان ولا يصلح للنظم التى فى حالة عدم اتزان

ولكى لا نفقد الفائدة من مخطط نطاق الطاقة كوسيلة مناسبة لاستنباط التركيزات بمجرد النظر، سنلجأ لمفهوم أشباه مستويات فرمى. فى هذا المفهوم يكون هنا زوج من أشباه مستوى فرمى الأول للإلكترونات F_n والثانى للشغرات F_p ويمكن تعريفهما كالآتى:

$$n \equiv n_i e^{(F_n - E_i)/kT}$$

$$F_n \equiv E_i + kT \ln \left(\frac{n}{n_i} \right) \quad \text{أو} \quad (3-72-a)$$

كذلك :

$$p \equiv n_i e^{(F_i - E_p)/kT}$$

$$F_p \equiv E_i + kT \ln \left(\frac{p}{n_i} \right) \quad \text{أو} \quad (3-72-b)$$

الثابتان F_p ، F_n يتحددان فقط بمعلومية قيم n ، p وليس قبل ذلك. كذلك فإن كلا من F_p و F_n سينطبقان على مستوى فرمى E_F إذا ما عادت قيم n و p إلى قيم الاتزان n_o ، p_o ؛ لأن فى هذه الحالة ستؤول المعادلة (3-72) إلى (3-71).

وكتطبيق مباشر على مفهوم أشباه مستوى فرمى نعود للمثال (٣-١) عندما $t \gg \tau_p$. أولا لا تتغير n كثيرا $n \approx n_o$ وبالتالي $F_n \approx E_F$. ثانيا إذا عوضنا بالقيمة $p = 10^{11}/\text{cm}^3$ فى المعادلة (3-72-b) نجد أن : $F_p \approx E_i - 0.06 \text{ eV}$ ، وبالتالي نستطيع أن نرسم مخطط نطاق طاقة جديد يبين F_n ، F_p وكذلك E_i ، انظر الشكل (٣-٢٨ ب). طبعاً بمجرد النظر سنعرف أننا بإزاء حالة عدم اتزان. كذلك بملاحظة أن الفرق $E_i - F_p$ فى الشكل (٣-٢٨ ب) أقل من الفرق $F_n - E_i$ سنعرف على الفور أننا إزاء حقن منخفض المستوى. طبعاً إذا كانت p معتمدة على x سنجد أن F_p أيضاً تعتمد على x .

نقطة أخيرة، يمكن استخدام أشباه مستويات فرمى فى إعادة صياغة بعض علاقات حركة الحاملات فى صيغة مختصرة. فمثلاً : الصورة القياسية لتيار الشغرات الكلى هى:

$$J_p = q \mu_p p \mathcal{E} - q D_p \nabla p \quad (3-73)$$

[وهي نفسها المعادلة (3-18-a)]. بتفاضل طرفى المعادلة b 72 نحصل على :

$$\nabla p = \left(\frac{n_i}{kT} \right) e^{(E_i - F_p)/kT} (\nabla E_i - \nabla F_p) \quad (3-74-a)$$

$$= \left(\frac{q p}{kT} \right) \mathcal{E} - \left(\frac{p}{kT} \right) \nabla F_p \quad (3-74-b)$$

حيث استخدمنا التعويض $\mathcal{E} = \frac{\nabla E_i}{q}$ (الذى هو تعميم للمعادلة (3-15) لثلاثة أبعاد) فى الوصول من (3-74-a) إلى (3-74-b). الخطوة التالية هى أن نحذف ∇p فى المعادلة (3-73) باستخدام (3-74-b).

$$J_p = q \left(\mu_p - \frac{q D_p}{kT} \right) p \mathcal{E} + \left(\frac{q D_p}{kT} \right) p \nabla F_p \quad (3-75)$$

لكن من علاقة أينشتين $q D_p / kT = \mu_p$ ، وبالتالي :

$$J_p = \mu_p p \nabla F_p \quad (3-76)$$

وبالمثل :

$$J_n = \mu_n n \nabla F_n \quad (3-76)$$

إذن التيار الكلى يتناسب مع ميل شبيهى مستويات فرمى F_p ، F_n . هذا معناه أن ميل شبيه مستوى فرمى عن الأفقية يشير لوجود تيار ، وعندما يكون أفقيا سيعنى عدم وجود تيار مار فى شبه الموصل.

مثال ٣-١ :

فى المثال (٣-٥) وجدنا أن الإضاءة السطحية غير النافذة سببت حالة استقرار ، والى عندها الشفرات الإضافية $\Delta p_n(x) = \Delta p_{n0} \exp(-x/L_p)$. بافترض أن الحقن منخفض المستوى فإن $n = n_0$ ، $p \approx p_0 + \Delta p_{n0} e^{-x/L_p}$.

للجنة المضاء :

أ - من المعادلة (3-72) اوجد العلاقة المشابهة للمستويين F_p ، F_n فى القضيب المضاء .

ب- بين أن F_p دالة خطية فى x للنقط التى عندها $p_0 \ll \Delta p_n(x)$.

ج- من الجزئين 1 ، ب ارسم مخطط نطاق الطاقة الخاص بالمثال (3-5) تحت ظروف التوازن والاستقرار والإضاءة المستمرة (افترض أن $E = 0$ بداخل العينة المعرضة للضوء).

د - هل يوجد تيار شغرات داخل العينة المضاءة فى حالة استقرار ؟ فسر.

هـ- هل يوجد تيار إلكترونات ؟ فسر.

الحل :

أ - حيث إن $n = n_0$ إذن من المعادلة (3-72-a) $F_n = E_F$. بالتعويض عن p كما فى رأس السؤال فى المعادلة (3-72-a) نستنتج أن :

$$F_p = E_i - kT \ln (p/n_i)$$

$$= E_i - kT \ln [p/n_i + (\Delta p_{no} / n_i) e^{-x/L_p}]$$

ب- فى المنطقة التى عندها $p_0 / n_i \gg \Delta p_{no} / n_i e^{-x/L_p}$ (أى قرب $x = 0$).

$$F_p \approx E_i - kT \ln (\Delta p_{no} / n_i) e^{-x/L_p}$$

$$= E_i - kT \ln (\Delta p_{no} / n_i) + (kT / L_p) x$$

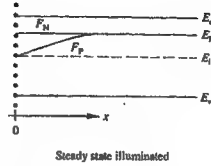
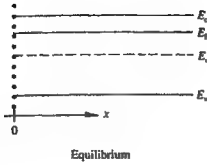
ج- من مثال (3-5) نعرف أن $\Delta p_{no} = 10^{10} / \text{cm}^3$ ، $n_i = 10^{10} / \text{cm}^3$ ، وأيضا $p_0 = n_i^2 / N_D = 10^5 / \text{cm}^3$ ، وبالتالي قرب $x = 0$ نجد من الجزء (ب) أن F_p تتغير خطيا مع x .

* عند $x = 0$ وبما أن $\Delta p_{no} = n_i$ إذن من الجزء (ب) $F_p = E_F$.

* عند x كبيرة $p = p_0$ ، وبالتالي $F_p = E_F$.

$$F_N - E_i = E_F - E_i = kT \ln (N_D / n_i) = 0.30 \text{ V}$$

من النقط السابقة نرسم مخطط نطاق الطاقة الآتى:



مثال (٦-٣) حل الجزء (ج)

د - بما أن $dF_p/dx \neq 0$ ، وبالنظر للمعادلة (3-76-a) نستنتج أنه يوجد تيار شغرات قرب $x = 0$.

المظهر خداع. بالنظر لمخطط الطاقة سنجد أن F_n تقريباً أفقى بالتالى $dF_n/dx \approx 0$ فربما نقول أن $J_n = 0$ لكن هذا استنتاج خاطئ؛ لأن التيار الكلى يساوى صفراً، فى حالة الاستقرار أى أن : $J_p + J_n = 0$ وبما أن $J_p \neq 0$ إذن $J_n \neq 0$ صحيح أن dF_n/dx تقريباً صفر لكنه ليس بصفر على أى حال، كما أن n (تركيز الأغلبية) كبير، وبالتالي حاصل الضرب $n dF_n/dx$ لا يساوى صفراً. \therefore الإجابة الصحيحة يوجد تيار، $J_n \neq 0$.

(٦-٣) ملخص وملاحظات ختامية

خصصنا معظم الفصل لمناقشة الفاعليات الأولية الثلاث للحاملات داخل شبه الموصل: الانسياب والانتشار والالتصاق - التوليد. فى كل حالة جرى تعريف الفاعلية ثم تصورها. الانسياب هو حركة الجسيمات المشحونة كاستجابة للمجال الكهربى المطبق. الانتشار هو هجرة الجسيمات من مناطق التركيز العالى للمناطق ذات التركيز الأقل بفعل الحركة الحرارية العشوائية. الالتصاق - التوليد هو على التوالى فناء وظهور الحاملات. بعدها تم تحليل كل فاعلية على حدة من الناحية الكمية. ينشأ تيار جسيمات عن الانسياب والانتشار (المعادلات 4، 17، 19) أما الالتصاق - التوليد فيتسببان فى التغير الموضعى لتركيز الحاملات كدالة فى الزمن (معادلة 34). وبالتحليل الكمى لكل فاعلية ظهر فى كل حالة «ثابت حركة» يحدد مدى نشاط هذه الفاعلية فى شبه الموصل المعطى

وكذلك حركات الحاملات ومعاملات الانتشار وأعمار الحاملات الأقلية هي البارامترات (الوسائط) المعتمدة على نوع المادة في حالات الانسياب، الانتشار، والالتصام - التوليد على التوالي. وبالنسبة لأشباه الموصلات الرئيسية توجد بيانات دقيقة عن تغير حركات الحاملات كدالة في درجة الحرارة والإشابة. عينة من هذه البيانات موضحة بالشكلين 5، 7. معاملات الانتشار يتم حسابها من الحركات المناظرة باستخدام علاقة آينشتين (معادلة 25). وعلى العكس فإن أعمار الحاملات في عينة ما لشبه موصل يتم تحديدها عن طريق القياس العملي:

وبالرغم من أن الأنواع المختلفة لفاعليات الحاملات قد تم تقديمها وفحصها كل على حدة، إلا أنها في الواقع تحدث معا في وقت واحد. الدمج الرياضى للحصول على التأثير الإجمالي لانتشطة الحاملات يؤدي إلى معادلة الاتصال (معادلة 46). ومعادلة الاتصال بدورها يمكن تبسيطها للوصول إلى معادلة انتشار الحاملات الأقلية (معادلة 54) بعد فرض سلسلة من الافتراضات الشائعة في كثير من المسائل العملية. التبسيطات الإضافية وأثارها على معادلة انتشار الأقلية مبينة بالجدول (3-1). الحلول شائعة الاستخدام للصيغ المبسطة من معادلة الانتشار مدرجة بالجدول (3-2).

معادلات الاتصال أو انتشار الحاملات الأقلية بالاشتراك مع معادلات أخرى مذكورة في هذا الفصل تمكننا من نمذجة حالة شبه الموصل المتعرض لقلقلة خارجية. جدول (3-3) يغطي المعادلات الهامة في هذا الفصل.

تعرضنا أيضا في هذا الفصل لمواضيع أخرى على علاقة بفاعليات الحاملات في شبه الموصل ومنها: المقاومة وقياسها، قياسات المجس الساخن، ثبات مستوى فرمى في ظروف الاتزان عند كل مواضع شبه الموصل، الإشابة غير المنتظمة وارتباطها بالمجال الكهربى المبيت، مخططات الطاقة مع كمية الحركة $E-k$ ، قياس عمر الحاملات الأقلية، أطوال الانتشار. في مواضع مختلفة بهذا الفصل تعرضنا لتفاصيل مخطط نطاق الطاقة. ورأينا مثلا أن وجود مجال كهربى داخل شبه الموصل يؤدي إلى اثتناء النطاقات كدالة في الموضوع. وعندما ناقشنا الالتصام - التوليد أضفنا مستوى طاقة جديد قرب منتصف فجوة الطاقة. هذا المستوى الناتج عن وجود مراكز $R-G$ يلعب دورا هاما في التفاعلات الحرارية بين نطاقى التكافؤ والتوصيل. وفي النهاية قللنا أشباه مستوى فرمى لوصف ظروف عدم الاتزان.

Table 3.3 Carrier Action Equation Summary.

معادلات الحالة	Equations of State	
$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_N + \left. \frac{\partial n}{\partial t} \right _{\text{thermal R-G}} + \left. \frac{\partial n}{\partial t} \right _{\text{other processes}}$	$\frac{\partial \Delta n_R}{\partial t} = D_N \frac{\partial^2 \Delta n_R}{\partial x^2} - \frac{\Delta n_R}{\tau_n} + G_L$	
$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_P + \left. \frac{\partial p}{\partial t} \right _{\text{thermal R-G}} + \left. \frac{\partial p}{\partial t} \right _{\text{other processes}}$	$\frac{\partial \Delta p_R}{\partial t} = D_P \frac{\partial^2 \Delta p_R}{\partial x^2} - \frac{\Delta p_R}{\tau_p} + G_L$	
R-G و التيار العلاقات	Current and R-G Relationships	
$\mathbf{J}_N = \mathbf{J}_{N\text{drift}} + \mathbf{J}_{N\text{diff}} = q\mu_n n \mathcal{E} + qD_N \nabla n$	$\left. \frac{\partial n}{\partial t} \right _{\text{thermal R-G}} = -\frac{\Delta n}{\tau_n}$	
$\mathbf{J}_P = \mathbf{J}_{P\text{drift}} + \mathbf{J}_{P\text{diff}} = q\mu_p p \mathcal{E} - qD_P \nabla p$	$\left. \frac{\partial p}{\partial t} \right _{\text{thermal R-G}} = -\frac{\Delta p}{\tau_p}$	
$\mathbf{J} = \mathbf{J}_N + \mathbf{J}_P$		
علاقات وسائط محورية	Key Parametric Relationships	
$L_N = \sqrt{D_N \tau_n}$	$\frac{D_N}{\mu_n} = \frac{kT}{q}$	$\tau_n = \frac{1}{c_n N_T}$
$L_P = \sqrt{D_P \tau_p}$	$\frac{D_P}{\mu_p} = \frac{kT}{q}$	$\tau_p = \frac{1}{c_p N_T}$
علاقات مقاومة وكهروستاتيكية	Resistivity and Electrostatic Relationships	
$\rho = \frac{1}{q(\mu_n n + \mu_p p)}$	$\rho = \frac{1}{q\mu_n N_D}$... n-type semiconductor
	$\rho = \frac{1}{q\mu_p N_A}$... p-type semiconductor
$\mathcal{E} = \frac{1}{q} \frac{dE_x}{dx} = \frac{1}{q} \frac{dE_z}{dx} = \frac{1}{q} \frac{dE_t}{dx}$	$V = -\frac{1}{q} (E_c - E_{\text{ref}})$	
علاقات شويبي فرمي	Quasi-Fermi Level Relationships	
$F_N = E_i + kT \ln\left(\frac{n}{n_i}\right)$	$\mathbf{J}_N = \mu_n n \nabla F_N$	
$F_P = E_i - kT \ln\left(\frac{p}{n_i}\right)$	$\mathbf{J}_P = \mu_p p \nabla F_P$	

أسئلة على الفصل الثالث :

١ - باستخدام مخطط نطاق الطاقة بين كيف يمكن تصوير :

أ - وجود مجال كهربي بداخل شبه موصل.

ب- إلكترون بطاقة حركة $K.E = 0$.

ج- شغرة بطاقة حركة $K.E. = E_G / 4$.

د - توليد ضوئي.

هـ- توليد حرارى مباشر.

و- الثتام نطاق لنطاق.

ز- الثتام عبر مراكز $R-G$.

ح- توليد عبر مراكز $R-G$.

٢- اكتب إجابات قصيرة على الآتي :

١ - تتحرك الشغرات بسرعة انسياق متوسطة مقدارها 10^3 cm/sec عندما يكون

هناك فرق جهد مقداره $2V$ بين طرفى قضيب شبه موصل طوله 1 cm ما

هى حركية الشغرات داخل القضيب ؟

ب- سمى أهم آليتين تبعثر استطارة الحاملات فى شبه الموصل المشاب غير المنكك

والذى جودته تصلح للنباط.

ج- هل حركية الناقلية تقل أو تزيد مع زيادة الإشابة ؟ قدم تفسيراً لإجابتك.

د - رفاقتان Ga As الأولى من النوع n ، والأخرى من النوع p بحيث N_D فى

الرقاقة الأولى تساوى N_A فى الرقاقة الثانية وكتلتاهما أكبر كثيراً من n_i حدد

الرقاقة الأعلى مقاومة. اشرح.

هـ- تحددت حركية الإلكترونات فى عينة سيليكون بالقيمة $1300 \text{ cm}^2/V.\text{sec}$

عند درجة حرارة الغرفة. ما هو معامل الانتشار للإلكترونات ؟

و - ما هو التعبير الرياضى للحقن المنخفض المستوى؟

ز - استخدم ضوء لتوليد حاملات زائدة فى سيليكون. سيلتئم معظم هذه

الحالات الزائدة بواسطة الثتام (اختر واحدة) :

* نطاق - نطاق * مراكز R-G * ضوئي

ح- عينة شبه موصل نحوي $N_D = 10^{14} / \text{cm}^3$ مانحات ، و $N_A = 10^{11} / \text{cm}^3$ مراكز R - G . استخدمت هذه العينة في تصنيع نبطة وبعد التصنيع وجد أن $N_D = 10^{17} / \text{cm}^3$ مانحات ، و $N_A = 10^{10} / \text{cm}^3$ مراكز R-G .

هل أدى التصنيع لزيادة أم نقصان في عمر الحاملات الاقلية ؟ اشرح .

٣- الذاتية والمقاومية القصوى :

١ - احسب مقاومة الجرمانيوم والسيليكون وورنخيد الجاليوم عندما تكون هذه المواد ذاتية وعند 300 K .

ب- احسب أعلى مقاومة ممكنة للجرمانيوم والسيليكون و Ga As عند 300 K .

٤- مزيد من الأسئلة عن المقاومة :

١ - عينة سيليكون عند درجة حرارة الغرفة ومشابة بانتظام بتركيز مانحات $N_D = 10^{16} / \text{cm}^3$. احسب مقاومة العينة من المعادلة (3-8-a) . قارن القيمة المحسوبة بالقيمة المستخرجة من الشكل (٣-٨) .

ب- عوضت العينة في الجزء (١) بإضافة تركيز متقبلات $N_A = 10^{16} / \text{cm}^3$. احسب مقاومة العينة المعوضة : (حاذر عند التعويض بقيم الناقالية في هذا الجزء) .

ج- احسب مقاومة سيليكون ذاتي ($N_A = N_D = 0$) عند درجة حرارة الغرفة . قارن بين ρ المحسوبة هنا وتلك المحسوبة في الجزء (ب) .

د- صنعت مقاومة 500Ω من قطعة سيليكون من النوع n على شكل قضيب مساحة مقطعه 10^{-2} cm^2 وطوله 1 cm عين تركيز الإشابة المطلوب .

هـ- سخنت عينة سيليكون مشابة خفيفا ($N_D < 10^{14} / \text{cm}^3$) من درجة حرارة الغرفة إلى 100°C وبفرض أن $n_i \gg N_D$ في الحالتين فهل ستزيد أم ستقل مقاومة العينة؟ اشرح .

٥- سألك أستاذك أن تبني حساس حرارة لقياس المدى الحراري ($-30^\circ \text{C} < T < 40^\circ \text{C}$) .

وقررت أن تستخدم قضيباً من السيليكون غير المفكك لهذا الغرض على أن تستخدم التغير في مقاومته للدلالة على درجة الحرارة وأنت ستستعمل ملتيتر محمول بقيس المقاومة في المدى $1 \Omega < R < 1000 \Omega$.

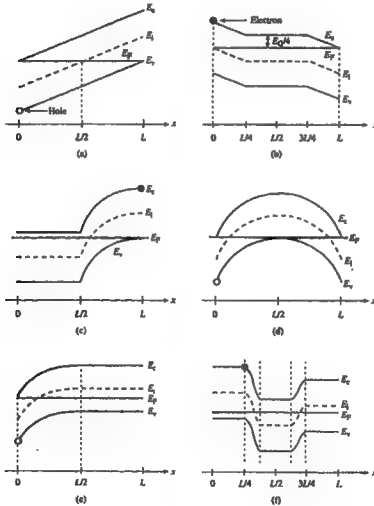
١ - حدد إشابة وأبعاد الحساس .

ب- احسب الحساسية dR/dT بوحدة $\Omega/^\circ\text{C}$ للحساس الذى اخترته . من وجهة نظر الحساسية هل الأفضل استخدام إشابة عالية أم منخفضة ؟ اشرح .

ج- ما هى أعلى وأقل درجة حرارة يمكن أن يستخدم فيها هذا الحساس تقريبا ؟

٦- تفسير مخططات نطاق الطاقة :

توجد فى الشكل (٣-٦) ستة مخططات نطاق طاقة لست عينات سيليكون مختلفة عند 300 K اختر واحدا فقط من هذه للمخططات (إذا قررت أن تعاود الكرة مع مخطط آخر فسيكون هذا قرارك أنت وليس قرارنا).



شكل (٣-٦)

١ - هل تسود ظروف الاتزان ؟ كيف عرفت ذلك ؟

ب- ارسم مخططا للجهد الاستاتيكي $V(x)$ كدالة في x .

ج- ارسم مخططا للمجال الكهربى $E(x)$ كدالة في x .

د - تتحرك الحاملة عبر العينة جيئة وذهابا بين النقطتين $x=0$ و $x=L$ بدون تغيير فى الطاقة الكلية. ارسم مخططا لكل من K.E. و P.E. للحاملة كدالة في x . اخذ E_F كمستوى مرجع.

هـ- ارسم مخططا سريعا لكل من n ، p كدالة في x .

و - ارسم أسهم توضح اتجاهات تيار الانسياب والانتشار -كل على حدة- فى كل المناطق. اشرح كيف اخترت الاتجاهات.

٧- داخل مركز ترانزستور Si ثنائي القطبية كانت الإشابة غير منتظمة بحيث إن: $0 \leq x \leq L$: $p(x) = N_A(x) = n_i e^{(a-x)/b}$ ،

حيث $L = 0.8 \mu m$ ، $b = 0.1 \mu m$ ، $a = 1.8 \mu m$.

١ - ارسم مخطط نطاق طاقة موضعا فيه مواضع E_v ، E_i ، E_F ، E_c . اشرح كيف توصلت لهذا للمخطط.

ب- ارسم مخطط المجال الكهربى $E(x)$ واحسب قيمة ϵ عند $x = L/2$.

ج- هل يساعد المجال المبيت حركة الإلكترونات فى الجزء من $x=0$ حتى $x=L$ ؟ اشرح.

٨- افترض أن $E_T = E_i$ وأن $n_I = p_I = n_i$ وأن $\Delta n = \Delta p$ وكذلك $\tau_n = \tau_p$.

اثبت أنه فى هذه الحالة تنول المعادلة العامة (3-35) للحالة الخاصة (3-34) فى حالة الحقن المنخفض المستوى.

٩- تعرف المعادلة $\frac{\partial \Delta n_p}{\partial t} = D_N \frac{\partial^2 \Delta n_p}{\partial x^2} - \frac{\Delta n_p}{\tau_n} + G_L$ بمعادلة انتشار الحاملات الأقلية للإلكترونات.

أ - لماذا تسمى معادلة انتشار ؟

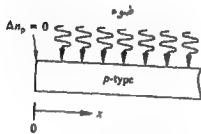
ب- لماذا تسمى بمعادلة حاملات أقلية؟

ج- هذه المعادلة صحيحة فقط عند مستوى حقن منخفض. لماذا؟

١٠- أثبت أنه في ظروف الحالة المستقرة فإن $0 \leq x \leq L$ $\Delta p_n(x) = \Delta p_{n0}(1 - x/L)$ داخل عينة Si من نوع n ستكون حلا خاصا لمعادلة انتشار الحاملات الأقلية - الشغرات هنا- إذا ما اعملنا كل عمليات R-G ، وافترضنا أيضا أن $\Delta p_n(0) = \Delta p_{n0}$ ، و $\Delta p_n(L) = 0$.
(عادة ما نهمل عمليات R-G إذا كان L أقل بكثير من طول انتشار الحاملات الأقلية L_p وسوف يستخدم هذا الحل الخاص كثيرا في هذه الحالة).

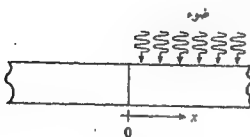
١١- رفاقة سيليكون $N_A = 10^{14} / \text{cm}^3$ ، $\tau_n = 1 \mu \text{sec}$ ، في درجة حرارة الغرفة) أضيئت أولا لفترة زمنية أطول كثيرا من τ_n بضوء ولّد $G_{LO} = 10^{16} e-hp$ (هو زوج إلكترون - شغرة) لكل cm^3 لكل ثانية بانتظام في الحيز الكامل للسيليكون.

عند $t = 0$ خفض الضوء بحيث تقلص المعدل G_{LO} إلى النصف $(\frac{G_{LO}}{2})$ لكل $t \geq 0$. احسب $\Delta n_p(t)$ لكل $t \geq 0$.



شكل (م ١٢-٣)

١٢- قضيب نصف نهائي من النوع p (انظر الشكل م ١٢-٣) يضاء بضوء يولد G_L زوجا من الإلكترونات - الشغرات لكل $\text{cm}^3 - \text{sec}$ بانتظام في الحيز الكامل لشبه الموصل . بنفس الوقت تسحب الحاملات عند $x = 0$ لتجعل $\Delta p_n = 0$ عند $x = 0$. بافتراض أن الحالة المستقرة قد تحققت وأن $\Delta n_p(x) \ll p_0$ لكل قيم x ، عين $\Delta n_p(x)$.



شكل (م ١٣-٣)

١٣- كما هو مبين بالشكل (م ١٤-٣) فإن الجزء $x > 0$ لشبه الموصل الممتد إلى ما لا نهاية من الطرفين هو فقط الذي يضاء . يولد الضوء $G_L = 10^{15}$ زوج إلكترونات شغرات بانتظام لكل $\text{cm}^3 - \text{sec}$ في منطقة القضيب $x > 0$. في المنطقة $x < 0$ $G_L = 0$. بافتراض استقرار الحالة وأن شبه الموصل عبارة عن

سيليكون مشاب بانتظام لـ $N_D = 10^{18} / \text{cm}^3$ ، $\tau_p = 10^{-6} \text{sec}$ ، وأن $T = 300 \text{K}$.

- أ - ما تركيز الشغرات عند $x = -\infty$ ؟ اشرح .
 ب - ما تركيز الشغرات عند $x = +\infty$ ؟ اشرح .
 ج - هل شرط الحقن المنخفض محقق ؟ اشرح .
 د - حدد $\Delta p_n(x)$ لكل قيم x .

تلميح :

كل من : $\Delta p_n(x)$ و $d\Delta p_n(x)/dx$ يجب أن يتصلا عند النقطة $x = 0$.

١٤- كبريتيد الكادميوم CdS هى المادة الأكثر استخداما فى تصنيع كواشف الموصلات الضوئية للضوء المرئى . الموصل المرئى CdS له حساسية ضوئية عالية ومنحنى رد الفعل الطيفى له يماثل نظيره للعين البشرية . الموديل VT 333 من الموصل الضوئى CdS مصور فى الشكل (م ٣-١٤) .



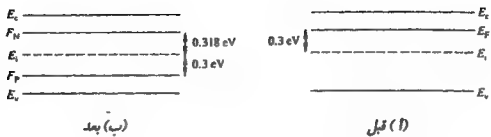
مخطط تفصيلى



شكل (م ٣-١٤)

- أ - تخمن لماذا يلتوى بمط الغشاء الموصل كالثعبان ؟
 ب - نفترض أن غشاء VT 333 باتساع 0.3 mm وطول 3 cm وسمك غشاء CdS هو 5 μm ، وأن $n_i \gg N_D = 10^{13}/cm^3$ و $\mu_n = 100 cm^2/V\cdot sec$ ، احسب المقاومة الظلامية للنقطة .
 ج - تصبح مقاومة VT 333 250 Ω إذا ما أضيئت بضوء معين . هل يمكن استخدام المعادلات المعتادة لتحديد G_L المطلوبة لإنتاج قيمة المقاومة المذكورة أعلاه ؟ اشرح .

١٥- تناظر ظروفي الاتزان المستقرة لشبه موصل قبل وبعد الإضاءة مخططى الطاقة بالشكل (م ٣-١٥) ، $T = 300 K$ ، $n_i = 10^{10}/cm^3$ ، $\mu_n = 1345 cm^2/V\cdot sec$ ، $\mu_p = 458 cm^2/V\cdot sec$. حدد من المعلومات المتوافرة :



شكل (م-٣-١٥)

١ - p_o ، n_o تركيزات الحاملات عند الاتزان.

ب - p ، n تحت الظروف المستقرة في وجود الإضاءة.

ج - N_D .

د - هل لدينا حقن منخفض المستوى ؟ اشرح.

هـ - احسب المقاومة قبل وبعد الإضاءة.



الفصل الرابع أساسيات تصنيع النماذج

BASICS OF DEVICE FABRICATION



(١-٤) مقدمة

نعرض فى هذا الفصل ملخصا مختصرا جدا لكيفية تصنيع نباط السيليكون. والهدف من هذا الفصل هو إعطاء فكرة عامة حول البنية الفيزيائية للنبيطة. وحتى هؤلاء الذين سوف يتعرضون فى المستقبل للدراسة نظرية بمحة عن النباط يمكنهم الاستفادة من هذا العرض؛ لأن الطريقة التى تبنى بها النبيطة ستحدد بارامترات تشغيلها، وبالتالي تؤثر على نوع التبسيطات والافتراضات التى نلجأ إليها عند تحليل عمل هذه النباط.

ونتناول فيما يلى العمليات الأساسية والتى تشبه لبنات البناء، فهذه العمليات تتكرر ضمن منظومات متكررة عند تصنيع الدائرة المتكاملة IC الحديثة.

وفى نهاية الفصل سنتناول منظومة العمليات المستخدمة فى تصنيع ثنائيات الوصلة pn كمثال توضيحي على كيفية تصنيع الدائرة المتكاملة، الوصلة pn تدخل فى بنية كثير من النباط المستخدمة اليوم. وسيخلو هذا الفصل من الأمثلة العددية والمسائل والمعادلات وسيعرض الموضوع بطريقة وصفية.

(٢-٤) عمليات التصنيع Fabrication Processes

١-٢-٤ الأكسدة Oxidation

أدى توافر السيليكون فائق الجودة إلى هيمنة هذا العنصر على تكنولوجيا النباط. ووظيفة أكسيد السيليكون مزدوجة؛ فهو يعمل كعازل كهربى داخل النبيطة، كما أنه يكبح انتشار ذرات الشوائب إلى مناطق غير مرغوب فيها داخل النبيطة أثناء عمليات تصنيعها. ويعتبر السيليكون شديد التفاعل وإذا تعرض لهواء الغرفة فسرعان ما يكون طبقة أكسيد رقيقة على سطحه. ولصنع طبقة أكسيد يترك السيليكون يتفاعل مع جو من الأكسجين (الأكسدة الجافة) أو مع بخار الماء (الأكسدة المبتلة) عند درجة حرارة عالية. فى كلتا الطريقتين يتسلل العامل المؤكسد خلال طبقة الأكسيد للسطح الفاصل بين السيليكون وأكسيده لتكوين مزيد من الأكسجين. لدينا هنا تفاعلان:



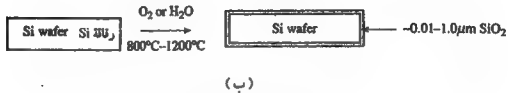
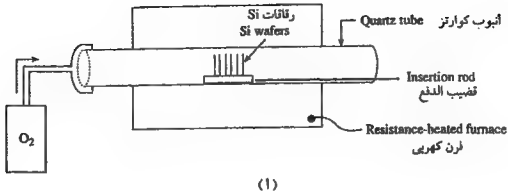
تستخدم الأكسدة الجافة فى تصنيع الطبقات العازلة للتيار، والتي عادة ما تكون غاية فى الدقة داخل بنية النبىطة. كمثال على ذلك نذكر طبقة الأكسيد الرقيقة تحت بوابة ترانزستور تأثير المجال MOSFET هنا لا بد من استخدام الأكسدة الجافة لأنها القادرة على إنتاج هذه الغللات الدقيقة بخواص ممتازة.

ومن ناحية أخرى تستخدم الأكسدة المبتلة فى تشكيل الحواجز السميكة بسرعة.

يوضح شكل (١-٤) خط إنتاج يشمل فرن الأكسدة-الانتشار.



شكل (١-٤) صورة خط إنتاج بنك الأفران المستخدمة للأكسدة والانتشار. نهايات ثلاثة من أفران تقع عند مركز بين الصورة ويجلس المشغل فى حخته للتنظيف بجانب لوحات التحكم بالأفران.



شكل (٤-٢)
(أ) مخطط توضيحي مبسط لنظام أكسدة
(ب) وصف موجز لعملية الأكسدة

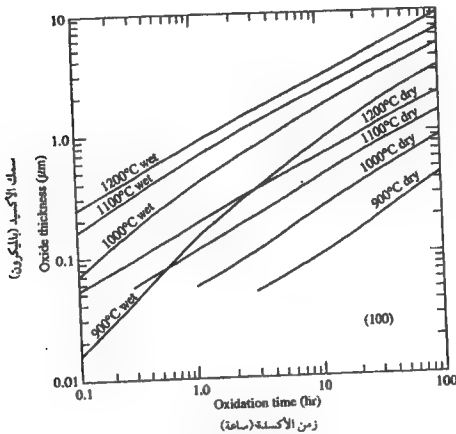
وبين شكل (٤-٢-١) تخطيطاً مبسطاً للفرن ونظام الإدخال بينما يلخص شكل (٤-٢-ب) عملية الأكسدة.

في عملية أكسدة لمطية يتم التسخين باستخدام سخان مقاومة عند درجة حرارة من ٨٠٠ درجة مئوية إلى ١٢٠٠ درجة مئوية. يتم تجهيز عناصر التسخين والتي تأخذ شكل ملفات بحيث يتم تسخين المنطقتين الطرفيتين بقدر أكبر لتعويض الفقد الحراري عند أطراف الفرن بحيث تكون درجة حرارة الفرن منتظمة على طول المنطقة الوسطى الطويلة نسبياً. وعموماً لا يسمح بتغير في درجة الحرارة على طول هذه المنطقة بأكثر من درجة واحدة مئوية. عادة ما تأخذ المنطقة الوسطى شكل أنبوب يصنع من الكوارتز الشفاف أو من كربيد السيليكون أو من سيليكون متعدد التبلور.

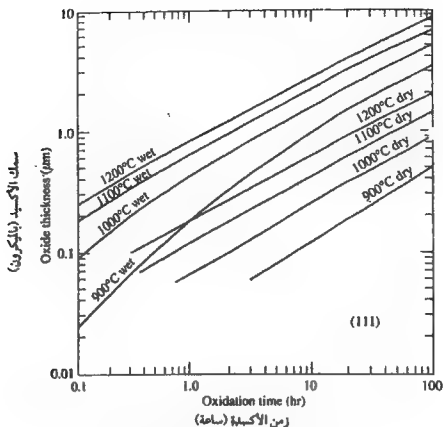
يتم تحميل رقائق السيليكون المراد أكسدةها رأسياً في شقوق تسمى بالقوارب محفورة في الكوارتز. وبعد التحميل تدفع القوارب إلى مركز الفرن. أثناء الأكسدة الجافة يندفع غاز الأكسجين من مؤخرة الأنبوب، أما في حالة الأكسدة المبتلة فإن الأكسجين يستبدل بغاز حامل (أرجون أو نتروجين) تم ترطيه قبل ذلك عن طريق ضخه

كفصافيع خلال ماء موجود بدورق ساخن. وأحيانا يستخدم بخار الماء فى الأكسدة، وللحصول على بخار ماء نقى يحرق خليط من الأكسجين والهيدروجين عند مدخل الفرن، وتسمى هذه الطريقة بالأكسدة البيروچينية المبتلة.

يتحدد زمن بقاء الرقائق بالفرن على عوامل كثيرة؛ أهم هذه العوامل هى درجة حرارة الفرن وثلخانة طبقة الأكسيد المطلوبة واتجاهية محاور بلورية الرقاقة بالنسبة لسطحها كما هو موضح بالشكلين (١-٣-٤)، فى النظم التجارية يتم التحكم أنوماتيكيا فى كل عمليات تحميل الرقائق ودفعها إلى الداخل وضبط الحرارة وضبط الغاز المتدفق.



شكل (١-٣-٤) منحنيات الأكسدة الجافة والمبتلة بسمك الأكسيد SiO_2 المتكون كدالة فى الزمن على سطح سيليكون (100)

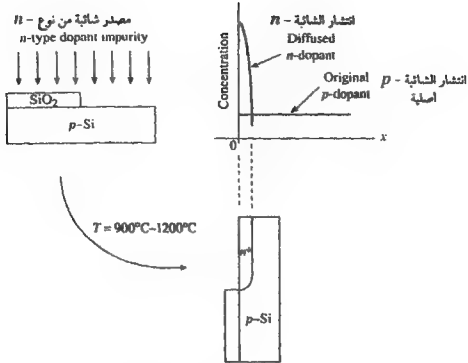


شكل (٤-٣-ب) منحنيات الأكسدة الجافة والرطبة
بمسك الأكسيد SiO_2 المتكون كغلاف في الزمن على
سطح سيليكون (111)

٤-٢-٢ الانتشار Diffusion

استخدم انتشار الذرات خلال مادة صلبة منذ زمن بعيد لتطعيم هذه المادة بذرات عنصر غريب. ويطبق نفس المبدأ إذا أريد تطعيم شبيكة شبه الموصل بذرات خارجية. ويوضح الشكل (٤-٤) عملية الانتشار حيث يتم تعريض سطح الرقائق شبه الموصل لمصدر الذرات الشائبة وهذا المصدر قد يكون في حالة صلبة أو سائلة أو غازية. وأجيانا قد نجري تفاعلا كيميائيا عند سطح الرقائق يؤدي إلى أن تنتشر الذرات المترسبة من التفاعل ببطء عند درجات حرارة عالية داخل شبه الموصل عبر المناطق غير المحمية بطبقة أكسيد. وتكون القوة الدافعة لهذا الانتشار هي فرق تركيز الذرات الشائبة خارج وداخل البلورة (من المعلوم أن الذرات تتحرك بفعل الحرارة من المناطق الأعلى تركيزا للمناطق الأقل تركيزا مثلما يحدث عند سقوط نقطة حبر داخل كوب من الماء النقي).

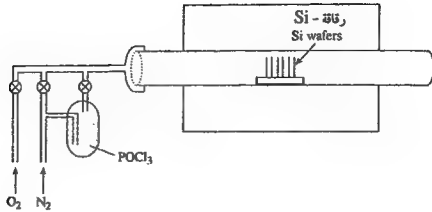
نستطيع الحصول على تركيز عال من الشوائب بهذه الطريقة قد يصل حتى 10^{21} ذرة شائبة لكل سم مكعب من مادة شبه الموصل. وطبقا لنوعية الذرات الشائبة يمكن



شكل (4-4) عمليات الانتشار الأساسية

التحكم في نوع المنطقة السطحية تشبه الموصل فنجعلها من النوع p أو النوع n حسب الرغبة. يجب أن نذكر هنا أن الانتشار يحدث أيضاً عبر طبقة الأكسيد لكن بمعدل بطيء للغاية بالمقارنة بالمناطق الخالية من الأكسيد، وهذا يعني أن الأكسيد يحمي الطبقة التي تحته من هجوم انتشار الذرات الغريبة لفترة زمنية محدودة. يتحدد زمن تعرض الرقائق للمادة الشائبة على عوامل منها ثخانة طبقة الأكسيد ودرجة الحرارة داخل شبه الموصل وعلى التركيز المتوافر خارج الرقاقة.

تنفذ عملية الانتشار داخل نظام أنبوبي مشابه للنظام المستخدم في بناء طبقات الأكسيد وتكون درجات الحرارة متشابهة أيضاً (تتراوح من 900°C ، وحتى 1200°C) الفرق بين العمليتين أن الوسط المؤكسد خارج الرقائق يستبدل هنا بمصدر للذرات الشائبة. يوضح الشكل (4-5) كيفية تطعيم رقائق السيليكون بذر من الفسفور عن طريق الانتشار. أولاً يمر الغاز الحامل (التروجين) كفقاعات خلال أوكسيكلوريد الفسفور السائل (POC) عند درجة حرارة الغرفة. يلتقط التروجين بخار السائل المصدر ويوصل هذا البخار لداخل أنبوب الفرن. في نفس الوقت يسمح لكمية صغيرة من غاز الأكسجين بالدخول للفرن ويتتج عن تفاعل بخار الأوكسيكلوريد مع الأكسجين ترسيب



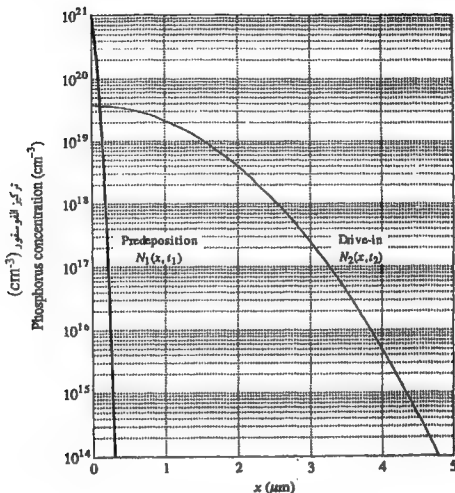
شكل (٤-٥) رسم تخطيطي لانتشار الفسفور باستخدام مصدر سائل

أكسيد الفسفور P_2O_5 على سطح رقاقة السيليكون. يتفاعل أكسيد الفسفور بدوره مع السيليكون محسرا ذرات الفسفور عند السطح. وبما أن درجة الحرارة تكون عالية تأخذ بعض ذرات السيليكون طريقها إلى داخل الرقائق، ويراعى أثناء عملية ترميز الفسفور عدم رفع درجة الحرارة لأن ذلك يؤدي إلى تكوين مركبات غير مرغوب فيها على سطح السيليكون؛ ولذلك يجب فصل مصدر الشوائب (غاز التروبيج للمحمل بأوكسيكلوريد الفسفور) قبل بدء الخطوة الثانية والتي يتم فيها تنشيط انتشار الشائبة التي تم ترسيبها في الخطوة السابقة. ومن الضروري رفع درجة الحرارة بالخطوة الثانية للإسراع بانتشار الفسفور لعمق رقائق السيليكون. تسمى الخطوة الأولى بخطوة قبل الترسيب *predeposition* وأثناءها يتم توصيل الشائبة لسطح الرقاقة. ثم تسمى الخطوة الثانية وتسمى بخطوة الدفع *drive-in* وعندما ينقطع مصدر الشوائب وترفع درجة الحرارة.

بعد تنفيذ الخطوتين السابقتين، قبل الترسيب ثم الدفع للدخول، نجد أن تركيز الشوائب داخل الرقاقة يمكن تمثيله بالدالة $N(x)$ حيث x تمثل المسافة التي عندها التركيز $N(x)$ مقاسة من السطح، الدالة $N(x)$ تشبه الجرس المقلوب وتسمى بدالة الجاوشيان :

$$N(x) = N_0 \exp \left(-\frac{x^2}{2\alpha^2} \right)$$

الثابتان N_0 و α يتحددان بأزمة ودرجات حرارة مرحلتى قبل الترسيب والدفع للدخول، الشكل (٤-٦) يبين تركيز ذرات الفسفور بعد خطوة قبل الترسيب استغرقت عشر دقائق وتليها خطوة دفع للدخول في ثلاثين دقيقة، وكانت درجة حرارة الخطوة الأولى 1000°C والثانية 1200°C .



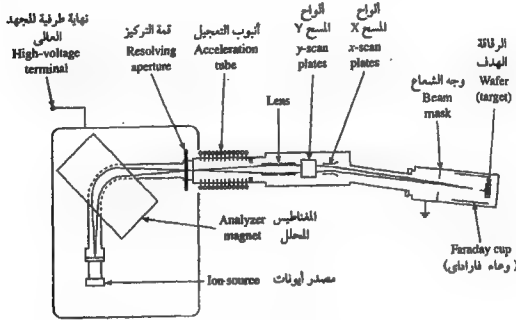
شكل (٤-٦) تغير تركيز الفسفور مع العمق (البروفيل)
كما هو محسوب من نماذج رياضية

٣-٢-٤ الغرس الأيوني Ion Implantation

الغرس الأيوني هو البديل المعاصر لعملية الانتشار لإدخال الذرات الشائبة للمنطقة القريبة لسطح شبه الموصل. والغرس الإلكتروني لا يمكن الاستغناء عنه عندما نريد أن نصنع وصلة pn بسمك رقيق وتركيزات شوائب عالية عند درجة حرارة منخفضة. ونظرا لأن الغرس الإلكتروني يوفر تحكما أدق بكثير من عملية الانتشار فقد أصبح حسان الشغل في عمليات التصنيع الحالية.

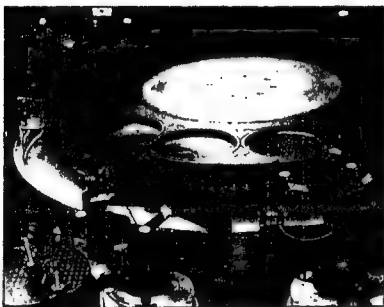
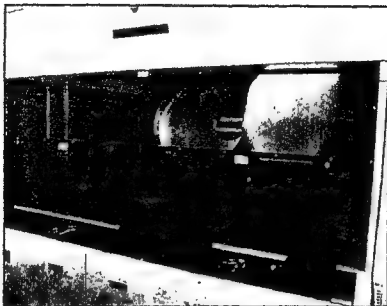
في هذه الطريقة تمحضر الشوائب على شكل أيونات ثم يتم تعجيل هذه الأيونات لطاقة عالية (من عدة كيلو إلكترون فولت وحتى عدة ميجا إلكترون فولت) ثم تطلق هذه

الأيونات السريعة على سطح شبه الموصل، وبذا تستقر بداخله فى الموضع المطلوب. طبعاً تطيح هذه الأيونات بعض ذرات السيليكون عن مواضعها البلورية الصحيحة منشئة عيوباً فى الانتظام البلورى، لكن هذه العيوب يمكن التخلص منها بسهولة عن طريق تلدين الرفائق بتسخينها وجعلها تبرد فى ببطء.



شكل (٧-٤) مخطط مبسط لنظام غرس أيونى

وبين الشكل (٧-٤) مخططاً مبسطاً للغرس الإلكترونى، كما يصور الشكل (٨-٤) محطة غرس تجارية تظهر فى يسار الشكل مرحلة فصل الأيونات المطلوبة باستعمال المطياف الكتلى لاستبعاد الأيونات غير المرغوب فيها. يلى ذلك مرحلة تعجيل الأيونات ويلها مرحلة تبشير الشعاع الأيونى وفى النهاية المسح والتى يتم فيها انحراف الشعاع الأيونى بواسطة جهد إستاتيكي لجعل الشعاع يغطى السطح المطلوب. فى بعض النظم لجعل الشعاع الأيونى ينحرف ليمسح سطح الرقاقة بالكامل وفى نظم أخرى يمسح الشعاع جزءاً صغيراً من الرقاقة ثم تحرك الرقاقة لمسح الجزء التالى وهكذا. يمر تيار صغير من الإلكترونات لظهر الرقاقة لمعادلة شحنة الأيونات المغروسة وعند قياس هذا التيار يمكن تحديد العدد الكلى للأيونات، وهذا العدد الذى يسمى بالجرفة هام للتحكم فى عملية الإشابة بالغرس الأيونى.

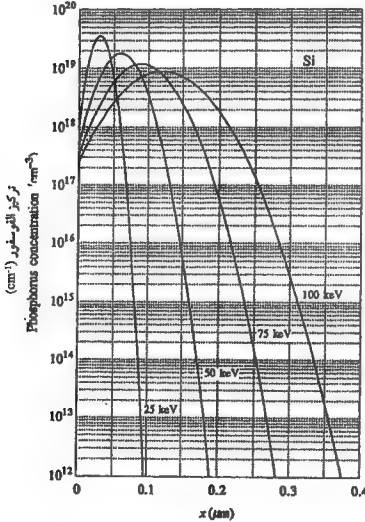


شكل (٨-٤) صورة لمحطة غرس أيوني
في الصورة العلوية الفتحة اليسرى مفتوحة لتحميل الرقائق، بينما يتم الغرس بالجزء الأيمن.
في الصورة السفلى صورة مكبرة لصحنون الرقائق وذراع الروبوت الذي يحمل وينزل الرقائق

يمكن تمثيل بروفيل الشوائب المغروسة بدالة جاوشيان مشابهة للدالة السابقة ولكنها مزاحة بأكملها إلى العمق بمسافة R_p أى :

$$N(x) = N_0 \exp \left[-\frac{(x - R_p)^2}{2 \alpha^2} \right]$$

يخبرنا علم الإحصاء أن R_p هو موضع قمة جرس الجاوشيان المقلوب أما α فهي اتساع هذا الجرس. فى كتاب كتالوجات أجهزة الغرس الإلكتروني تسمى R_p بمدى الإسقاط وتسمى α بالتطوُّح (الانحراف المعيارى). قيمتى مدى الإسقاط والتطوُّح تتحددان بحسب نوع الأيون الساقط وطاقته. كما تتحدد (N_0) بواسطة الجرعة المغروسة. يوضح الشكل (٩-٤) توزيعات محسوبة لتركيز الفسفور المغروس أيونيا داخل السيليكون عند قيم طاقات أيونية مختلفة.



شكل (٩-٤) البروفيل
المحسوب للفسفور المغروس
بجرعة ثابتة $10^{14}/\text{cm}^2$

وكما يحدث فى عملية الانتشار يلزم استخدام قناع أثناء الغرس الإلكتروني لمنع الغرس فى المناطق غير المطلوب إشتابها. ولهذا الغرض تستخدم طبقة رقيقة من أوكسيد السيليكون SiO_2 أو نيتريد السيليكون Si_3N_4 وفى أحيان قليلة قد تستخدم طبقة من الألومنيوم أو المقاوم الضوئى لهذا الغرض وبالأساس يوقف القناع الأيونات قبل وصولها للسيليكون فى المناطق غير المطلوب إشتابها.

مزايا الغرس الأيونى عديدة كما أسلفنا بالمقارنة بالانتشار فهو يجرى فى درجة حرارة منخفضة (درجة حرارة الغرفة) ولا يحتاج الغرس لتلين مرتفع الحرارة (يتم التلين عند درجة حرارة $600^{\circ}C$) وفى جميع الأحوال يمتاز الغرس بأن اتساع بروفيل الشوائب داخل السيليكون يكون أقل من نظيره فى عملية الانتشار وهذه ميزة أساسية عندما يتعلق الأمر بتصنيع النماط المتناهية الصغر التى تصنع روتينا اليوم. كما يسمح الغرس بالتحكم الدقيق فى تركيز المادة الشائبة كما يمكن استخدامه لغرس أى نوع من اللرات فى أى نوع من المواد.

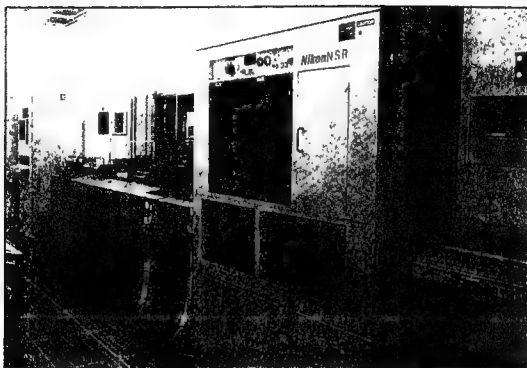
وفى تطور هام أمكن حديثا غرس جرعات كبيرة من ذرات الأكسجين بداخل السيليكون وبالتالي أمكن تكوين طبقة أوكسيد سيليكون SiO_2 فى عمق الرقاقة مما يفتح المجال لتكنولوجيا سيليكون فوق عازل (SOI) والتى تسمح بوجود عدة ملايين من النماط فى دائرة متكاملة واحدة.

وأخيرا، وكما يتضح من الشكل (٤-٩) فإنه يمكن غرس بروفيل من الشوائب بسمك صغير جدا (أى ضئيل للغاية)، وبالتالي يمكن أن يحل الغرس الأيونى محل خطوة قبل الترسيب فى عملية الانتشار، ويمثل هذا حلا مثاليا لمشكلة تصنيع النماط الحديثة التى تتطلب وصلات pn متناهية الضخامة.

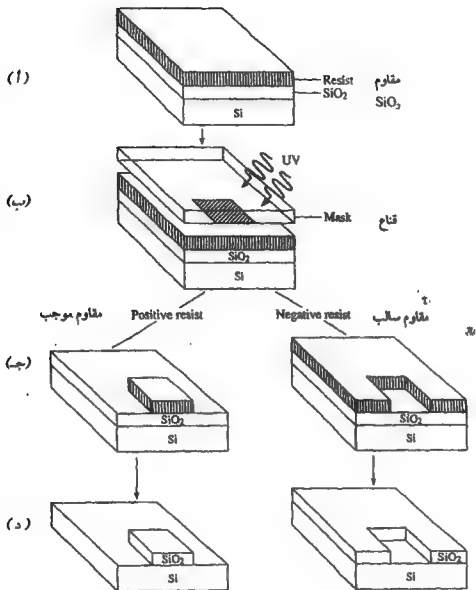
٤-٢-٤ النقش الليثوجرافى (الحجرى) Lithography

عند تعرضنا للانتشار والغرس الأيونى ذكرنا أن بعض المواد مثل أكسيد السيليكون يمكن استخدامها كقناع من غشاء رقيق على مناطق على سطح الرقيقة. النقش الليثوجرافى (الحجرى) عبارة عن إزالة مناطق معينة من هذا الغشاء الرقيق الذى يغطى سطح الرقيقة بفرض تكوين مناطق عازلة أو مناطق مغطاة بالمعدن أثناء صنع الدائرة المتكاملة. الصورة فى الشكل (٤-١٠) لخط إنتاج (محطة) نقش حجرى.

وبين الشكل (٤-١١) الخطوات الرئيسية لعملية النقش الحجرى، فأولا يطلّى سطح الرقيقة بطبقة من الأكسيد وفوقها يتم الطلاء بمادة حساسة للضوء فوق البنفسجى



شكل (١٠-٤) محطة نقش حجري الجزء الأوسط بالصورة العلوية نظام الطلاء والتظهير.
الصورة السفلى النظام الأتوماتيكي لإجراء عمليات الطلاء والتظهير والتصليد



شكل (4-11) الخطوات الرئيسية في عملية النقش الحجرى: (أ) وضع المقاوم، (ب) ترميض المقاوم للضوء من خلال القناع، (ج) بعد التطهير، (د) بعد إزالة الأكسيد والمقاوم

تسمى بالمقاوم الضوئى photoresist. عادة ما تكون هذه المادة على شكل سائل، بعد سقوط قطرات من هذا السائل على سطح الرقاقة تدار الرقاقة حول محورها بسرعة كبيرة كافية لتغطية (طلاء) السطح بطلاء رقيق ومتنظم السمك. يلى ذلك تسخين الرقاقة

لزمن قصير عند درجة حرارة منخفضة نسبياً (من 80 إلى 100 درجة مئوية) بغرض تقوية التصاق الطلاء بالسطح. ويشبه المقاوم الضوئي عند جفافه طبقة المستحلب التي نراها على فيلم التصوير الفوتوجرافي العادى. فى الخطوة التالية يتم تعريض المقاوم الضوئى لضوء فوق بنفسجى من خلال «قناع» كما نرى بالشكل (٤-١١ ب). هذا القناع عبارة عن لوح تصوير من الزجاج أو الكوارتز تم إعداده بعناية ليكون نسخة طبق الاصل من النسق المراد نقشه على طبقة الأكسيد. تحجب المناطق الداكنة لمستحلب القناع الضوء فوق البنفسجى، وهكذا تتم إضاءة مناطق مختارة من طبقة المقاوم الضوئى دون غيرها. يحدث تغير كيميائى للمناطق المعرضة للضوء فقط. وهنا لا بد من ذكر أنه يوجد نوعان من المقاوم الضوئى: موجب وسالب. فى النوع السالب تبلمر المنطقة المعرضة للضوء، وبالتالي سيصعب إذالتها لاحقاً وتظل فى مكانها بعد إجراء عملية التطهير التى مستزيلة المناطق التى لم تتعرض للضوء (انظر للجزء اليمين فى الشكل (٤-١١)) وعلى العكس من ذلك فإن المقاومات الموجبة تحوى على مادة حساسة تبطئ من معدل ذوبان المقاوم بواسطة سائل التطهير القلوى، وبالتالي فالمناطق المعرضة للضوء فى المقاوم الموجب تتكسر مادتها الحساسة وهذا يعرضها للذوبان كما هو مبين فى الجانب الأيسر من الشكل (٤-١١). فى الدارات المتكاملة القديمة كان المقاوم السالب هو الأكثر شيوعاً ولكن فى الدارات المتكاملة الحديثة يتم استخدام المقاوم الموجب بدلاً من السالب لما يوفره من أداء أفضل فى نقش خطوط أقل سمكاً، ومعروف أن الدارات الحديثة لها أبعاد متناهية فى الصغر.

فى الخطوات المتبقية يتم نسخ النسق المطلوب على غشاء الأكسيد. وبعد إجراء عمليتى الإضاءة ثم التطهير يتم تحميل المقاوم مباشرة عند درجة حرارة 120 إلى 180 درجة مئوية لمدة 20 إلى 30 دقيقة لتعوية التصاقه بسطح الأكسيد لكى يتحمل عملية الحفر اللاحقة. بعد ذلك تستخدم مادة مزيل للأكسيد (مثل فلوريد الهيدروجين) من المناطق غير للحماية بطبقة المقاوم.

بعد أن يقوم المقاوم بوظيفته يتم التخلص منه إما بتعريضه لسائل كيميائى خاص يعمل على انتفاخه ثم سقوطه أو بحرقه فى لهب (بلازما) غنى بالأكسجين يحيل المقاوم إلى رماد سهل إزالته.

مع اتجاه أبعاد النبائط للتصغير باستمرار فإن نظم النقش الحجرى المعتمدة على الضوء فوق البنفسجى قد تم دفعها لحدودها القصوى، وذلك باستخدام أطوال موجية أصغر فأصغر والتحاليل على الصعوبات الناشئة عن حيود الضوء ذى الطول الموجى

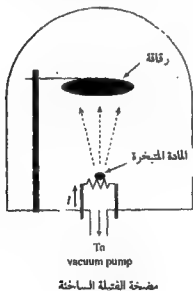
القصير بحيل تكنولوجية. لكن فى النهاية لا بد وأن تنجھ الصناعة للنظم المعتمدة على الأشعة السينية أو الأشعة فوق البنفسجية EUV ذات الطول الموجى الأقصر للملاحقة التصغير المستمر لأبعاد النماط.

٤-٢-٥ ترسيب الطبقات الرقيقة Thin-Film Deposition

لكى يتم توصيل قلب النبتة «بالعالم الخارجى» يلزم ترسيب نسق من أسلاك منقوشة على طبقة معدنية وفى الدارات الأكثر تعقيدا قد يلزم وجود ثلاث أو أربع من هذه الطبقات المعدنية المعزولة عن بعضها البعض. العزل الكهربى يعنى ترسيب طبقات عازلة بالتبادل مع طبقات معدنية. وأخيرا فلحماية النبتة من غزو الذرات الغريبة التى قد تنتشر لداخلها وكذلك لعزل المناطق الداخلية للدائرة المتكاملة بعضها عن بعض يلزم ترسيب طبقات سميكة من مادة عازلة. فيما يلى سنعرض الطرق المستخدمة لترسيب الطبقات المطلوبة.

التبخير Evaporation

التبخير طريقة قديمة وبسيطة لترسيب الأغشية الرقيقة. يوضع مصدر المادة المراد تبخيرها بالقرب من سلك تسخين فى غرفة مفرغة من الهواء (انظر الشكل ٤-١٢). فمثلا لتبخير الألومنيوم يوضع سلك قصير من الألومنيوم بجوار فتيلة ساخنة أو داخل قارب من مادة التنجستين. أمام المصدر مباشرة نضع الركيزة substrate المطلوب ترسيب الغشاء على سطحها. بعد تفريغ الغرفة من الهواء يسخن سلك التسخين كهربيا فتبخر ذرات مادة المصدر وتنتقل للقاعدة بسهولة بسبب الضغط المنخفض وتترسب على القاعدة.

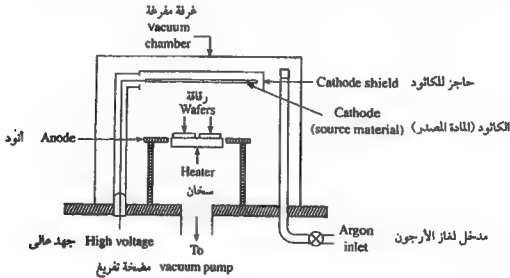


شكل (٤-١٢) تبخير الفتيلة الساخنة

يعيب طريقة التبخير تلوث الغشاء بذرات من مادة فتيلة سلك التسخين وللتغلب على هذه المشكلة ألغى سلك التسخين وتم تسخين مادة المصدر مباشرة بتعريضها لشعاع من الإلكترونات القوية. لكن يعيب هذه الطريقة أيضا انبعاث أشعة سينية ناتجة عن تصادم الإلكترونات بالمصدر، ووجد أن هذه الأشعة تسبب في ظهور عيوب في بلورة النبيتة؛ لذلك كله لا تستخدم طريقة التبخير في خطوط إنتاج النباط الحديدي ويقتصر استخدامها لإنتاج دارات النباط البسيطة والتي لا تتأثر بعيوب هذه الطريقة.

النفت Sputtering

يتشابه النفت مع التبخير. وكلاهما يتم في غرفة مفرغة حيث توضع مادة المصدر ومقابلها الركيزة (الرقاقة) على لوحين متقابلين بينهما فرق جهد كهربى عال (انظر الشكل ٤-١٣) أثناء الترسيب تفرغ الغرفة من الهواء ويتم إدخال غاز النفت (الأرجون عادة) تحت ضغط منخفض تتأين ذرات الأرجون بفعل الجهد العالى وتصير على هيئة بلازما. تنتج أيونات الأرجون الموجبة إلى لوح المصدر السالب وبعد تصادمها معه تخلع ذرات المصدر. ترسب هذه الذرات المخلوعة والمتعادلة كهربيا على الركيزة. في حالة ترسيب المعادن يكون الجهد الكهربى مستمرا ولكن عند ترسيب المواد العازلة يلزم استخدام جهد متردد بتردد عال (RF). عند ترسيب مركب كيميائى معين قد يلزم استخدام عازل من نفس نوع المركب الكيميائى لتحسين التحكم في نسب المكونات الكيميائية للغشاء المترسب. النفت هو الطريقة المثلى لترسيب الألومنيوم وغيره من المعادن؛ لأنه يعطى أغشية قليلة التلوث عند درجة حرارة منخفضة وبمعدل إنتاج مقبول.



شكل (٤-١٣) مخطط لنظام النفت DC المادة المصدر تغطي الكاثود بينما الرقاقة مركبة على الأنود

الوصلات الدمشقية

أعلنت كل من شركة IBM، وموتورولا عام ١٩٩٨م أنهما تمكنتا من إنتاج رقائقي بها ست طبقات من النحاس عوضا عن تقنية الألومنيوم السائدة حتى الآن. يتفوق النحاس على الألومنيوم في التوصيل الكهربى لكن بعض الصعوبات والمخاوف من أن يؤدي استخدام النحاس إلى تلويث معدات التصنيع حالت دون استخدامه.

تم التغلب على هذه الصعوبات بعملية ذات مرحلتين، وسميت باسم عملية دمشق؛ لأن الدمشقيون القدامى تمكنوا من نقش خطوط معدنية على الزجاج عن طريق حفر أخاديد على سطح الزجاج ثم ملء هذه الأخاديد بالمعدن.

فى العملية الدمشقية الحالية يطلّى النحاس كهريا على سطح الرقيقة بعد حفر أخاديد عليها بالنسب المطلوب وفى مرحلة تالية يكّثّ النحاس الزائد كيميائيا وميكانيكيا مع ترك النحاس المترسب داخل الأخاديد. تحفر الأخاديد بواسطة تتريد التيتانيوم.

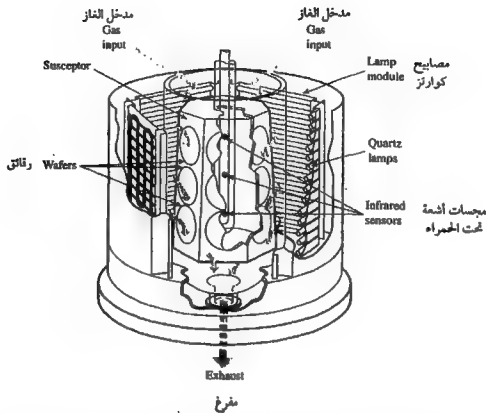
يمتاز النحاس بصغر مقاومته الكهربائية عن الألومنيوم وبالتالي يمكن استبدال أسلاك الألومنيوم بأسلاك من النحاس أقل سمكا مما يؤدي إلى تحسين الأداء والإقلال من التكلفة؛ لأن سمك الأسلاك سيكون أقل، كذلك يؤدي السمك الأقل إلى سعة كهربية capacitance أصغر وهذا معناه دارات تعمل عند ترددات أعلى. وتشير التوقعات أنه بحلول عام ٢٠١٢م سوف يتم التمكن من تصنيع معالجات صغيرة (دقيقة) بأبعاد تقل عن 0.05 ميكرون وسعات تصل إلى عشرة جيجا هيرتز ١١.

وربما يتقدم هذا الموعد عدة سنوات بعد أن تمكن فريق بحثى أمريكى فى أبريل ٢٠٠١م من تحقيق نقش حجري بأبعاد 30 nm باستخدام أشعة فوق بنفسجية متناهية القصر (Extreme UV). للتحكم فى هذه الأشعة استخدمت مرايا وقناع عاكس مصنوع من 40 طبقة رقيقة من الموليبدنم والسيليكون على التوالي. أما الأشعة نفسها فأمكن إنتاجها من غار رينون يتدفق بسرعة فوق صوتية وتستثار ذراته بضوء ليزر.

ترسيب البخار الكيميائى Chemical Vapor Deposition

يتكون الغشاء الرقيق فى طريقة ترسيب البخار الكيميائى لغاز أو أحد مكونات هذا الغاز. وإما أن يتحلل المركب الغازى أو تتفاعل مكوناته لتكوين الغشاء. يتم تحفيز التفاعلات على سطح الرقيقة والذي يعترض سريان الغاز. (انظر الشكل ٤-١٤).

ترمز الحروف الثلاثة CVD إلى هذه الطريقة التى يمكن تنفيذها فى أجواء مختلفة أهمها هى :



شكل (٤-١٤) المفاعل المستخدم في عمليات CVD وثبت الرقائق رأسيا وتسخن ببطء مصابيح الكوارتز. غازات المعالجة تدخل من أعلى مارة بالرقائق وتخرج محمورا من أسفل

١- في الضغط الجوي العادي APCVD

حيث يرمز الحرفان AP إلى الضغط الجوي Atmospheric Pressure وتصلح طريقة ترسيب البخار الكيميائي تحت ضغط جوي عادي للنظم البسيطة.

ب- تحت ضغط جوي منخفض LPCVD

LP ترمز للضغط المنخفض. وتشبه الطريقة السابقة مع تحسين في انتظام الغشاء كما أنها تستهلك غازات أقل.

ج- التحسين بالبلازما

يتكون جو البلازما من الإلكترونات نشيطة تعمل على تنشيط تفاعل الأبخرة دون اللجوء لرفع درجة الحرارة.

تستخدم طريقة الترسيب للبخر الكيميائي بصورة روتينية عند عمل الأتعة وفي ترسيب الطبقات التي تعزل الطبقات المعدنية بعضها عن بعض في الدارات التكاملة المعقدة. كما أنها تستخدم في تكوين طبقة السيليكون المتعدد والتي يمكن أن تؤدي وظيفة الطبقة المعدنية إذا تم تطعيمها بتركيز عال من الشوائب.

النمو المتراص Epitaxy

في كل الطرق السابقة لا يمكن ترسيب الغشاء في صورة بلورية بل في صورة متعدد البلورة. الطريقة الوحيدة لتكوين غشاء بلوري هي طريقة النمو المتراص وفيها يتم نمو بلورة الغشاء على نفس نسق الشبكة الموجودة تحت الغشاء. ومصطلح epitaxy يتكون من مقطعين معناهما بالإغريقية «الرص فوق».

في هذه الطريقة يتم إمرار أبخرة من مركبات السيليكون (مثل تتراكلوريد السيليكون) على سطح الرقيقة كما في طريقة ترسيب البخر الكيميائي وكتيجة للتفاعلات الحادثة ترسب ذرات السيليكون على نفس اتجاه البلورة التحتية. وأثناء نمو السيليكون البلوري يمكن تطعيمه بالشوائب عن طريق إدخال غازات حاوية للشوائب مثل الفوسفين PH_3 والدابورين B_2H_6 أو الزرنيخ (AsH_3) أثناء الترسيب.

ويجب استكمال النمو المتراص السابق لكل سطح الرقاقة قبل ترسيب أي أغشية مستديرة والتي تتم في مرحلة لاحقة. ويجب ملاحظة أن الرقائق المستخدمة في هذه الطريقة قد تشتري من مورد الرقائق وعليها طبقة الرص epi-layer مسبقا.



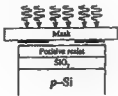


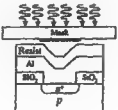
(٢-٤) الوصلة pn كمثال لتصنيع الترانزستور

pn Junction as Example for Device Fabrication

نوضح في هذا الجزء كيف يتم تسلسل العمليات المفردة التي ناقشناها سابقا من أجل إنتاج نيطة نهائية. والمثال الذي سنعرضه هنا يتعلق بتصنيع وصلة pn وفيه سنعرض الخطوات الرئيسية دون الدخول في تفاصيل هذه العمليات. هذه العمليات موضحة بالشكل (١٥-٤) وهي :

0- البداية رقاقة سابقة التنظيف ومستوية السطح ومصنوعة من السيليكون التام البلورة الخالي من العيوب (خطوة «0» في الشكل).

1- الأكسدة الحرارية وفيها يتم ضبط سمك طبقة الأكسيد ليمسح بالانتشار الانتقائي للشوائب في المراحل التالية (الخطوة 1 في الشكل).

Step	Process	Visualization
(0)	Start	 <p>البداية</p>
(1)	Oxidation	 <p>الأكسدة</p>
(2)	Lithography #1	 <p>التنقش الحجري الأول</p>
(3)	Phosphorus diffusion	 <p>الانتشار</p>
(4)	Metallization (sputter Al)	 <p>الفلت</p>
(5)	Lithography #2	 <p>التنقش الحجري الثاني</p>

شكل (٤-١٥) ملخص بالمصور للخطوات الرئيسية لتكوين نايرود وصلة $p-n$

2- النقش الحجرى رقم (1) باستخدام مقاوم ضوئى موجب وقناع به فتحة لإزالة طبقة الأكسيد فقط تحت الفتحة، وبالتالي تكون هناك فتحة فى طبقة الأكسيد لانتشار الشوائب تحتها (انظر خطوة (2) فى الشكل).

3- إدخال الرقائق لفرن ما قبل الترسيب ثم إدخال لفرن إيلاج الفوسفور، يلزم وجود بعض الأكسجين للمساعدة فى فصل الفسفور من المركب الغازى المحتوى الفسفور (P_2OCl_3). انظر خطوة (3) فى الشكل. (للتبسيط تم إغفال رسم خطوة نقش حجرى لازمة لإزالة طبقة أكسيد مساعدة لعملية التطعيم الفسفورى).

4- نفث الألومنيوم لتوصيل النيطة بالخارج على هيئة طبقة رقيقة تغطى الرقيقة بالكامل. خطوة (4).

5- وأخيرا خطوة نقش حجرى لتحديد مسارات الألومنيوم وإزالة الزائد من الألومنيوم تتبعها خطوة تليين حرارى عند درجة حرارة أقل من 500 درجة مئوية لتحسين التوصلة الكهربائية بين الألومنيوم والطبقة π^+ تحته. خطوة (5).

بعد ترسيب الألومنيوم تصبح الدايدودات الموجودة على سطح الرقيقة جاهزة للعمل، ولكى تكون جاهزة تجاريا تقطع الرقيقة بمنشار له شفرة من الماس إلى أجزاء صغيرة يحوى كل منها دايدودا. يسمى جزء الرقاقة الذى يحوى نيطة كاملة أو دائرة متكاملة بال قالب (die). ترسب تحت القالب أطراف توصيل معدنية كبيرة ويتم توصيل هذه الأطراف بنظائرها على سطح القالب، ثم توضع القوالب داخل كبسولات من البلاستيك القوى أو أغلفة معدنية محكمة الغلق.



الفصل الخامس

الوصلة الثنائية

The pn Junction

	
- مقدمة	
(١-٥) الوصلة pn عند الاستقرار الحرارى	
(٢-٥) ارتفاع حاجز جهد الوصلة pn	
(٣-٥) تقريب النضوب والمجال الكهربى والجهد	
(٤-٥) الصيغ الرياضية لعناصر الوصلة	
(٥-٥) الوصلة pn المبتورة ذات الجانب الواحد	
(٦-٥) تطبيق جهد انحياز على الوصلة pn	
(٧-٥) التفسير الكيضى للانحياز الأمامى	
(٨-٥) المعادلة المثلى للثنائى	
(٩-٥) الانهيار العكسى	
(١٠-٥) سعة النضوب	
(١١-٥) ملخص الفصل	
أسئلة الفصل	

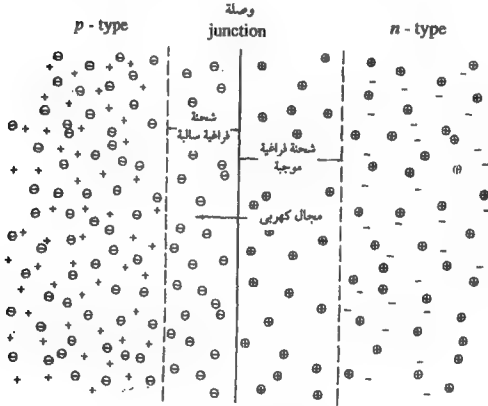


مقدمة:

الوصلة الثنائية pn هي حد فاصل داخلي ضمن بلورة أحادية من مادة شبه موصل. على أحد جانبي هذا الحد n تكون فيه الغلبة للذرات المانحة بينما تكون الغلبة على الجانب الآخر p للذرات المتقبلة، شكل (١-٥). وهذه الوصلة هي أبسط نباتات أشباه الموصلات المعروفة.

والفهم الفيزيائي لأداء هذه الوصلة يعتبر أمراً بالغ الصعوبة، غير أنه يقود إلى الكشف عن طريقه عمل نباتات أخرى مثل:

- أ - الثنائي الضوئي.
- ب - الثنائي باعث الضوء.
- ج - الثنائي متغير السعة.
- د - الترانزيستور ثنائي القطب.



شكل (١-٥) طبقات شحنات الفراغ داخل الوصلة pn وعلى جانبيها، وتولد للجبال الكهربائي الداخلي نتيجة انتشار الشحنات الغالبة قرب الوصلة

- (+) أيونات شوائب مانحة، + شفرات حرة.
- (-) أيونات شوائب مستقبلة، - إلكترونات حرة

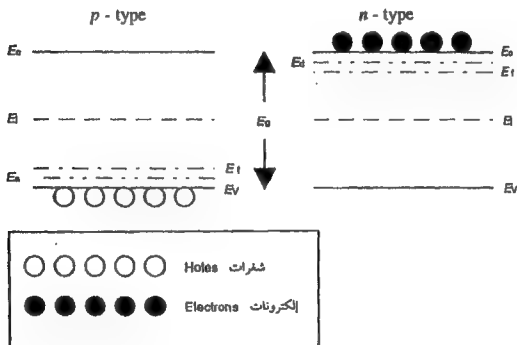
وعلى ذلك فإن دراسة عمل الوصلة الثنائية pn للتعرف على كيفية أدائها لوظيفتها يعتبر حجر الزاوية فى دراسة النماط الإلكترونية.

(١-٥) الوصلة pn عند الاستقرار الحرارى :

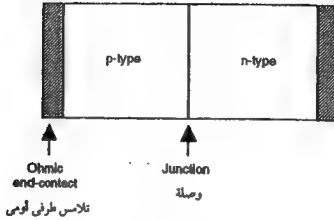
The pn Junction in Thermal Equilibrium

تكمّن أهمية الوصلة pn فى عملها كمقوم للتيار الكهربى المتردد حيث تسمح بمروره فى اتجاه واحد فقط، وهى بذلك تمثل أبسط أنواع نماط أشباه الموصلات ويطلق عليها بشكل عام تسمية الثنائى، وسوف نستخدم فى هذا الجزء تلك التسمية عند التحدث عن الوصلة pn ونبدأ بتصوير نمطة تستخدم كلا نوعى الشحنة الكهربائية من الإلكترونات السالبة والشواغر الموجبة.

نعلم أن مخطط مستويات الطاقة تشابه لائى من نوعى شبه الموصل p أو n وذلك كما يظهرهما شكل (٢-٥). لكننا لمجهل ما قد يحدث عندما تتكون الوصلة pn ، شكل (٣-٥).



شكل (٢-٥) مخطط متناسب الطاقة لى نوعى شبه الموصل



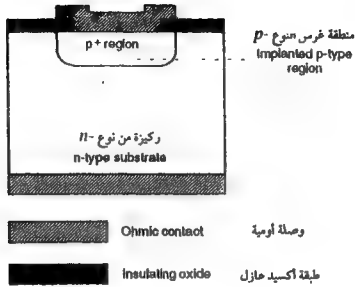
شكل (٣-٥) الوصلة pn بين نوعي شبه الموصل p ، n والوصلة الأومية عند طرفي النشطة

إذا أمعنا النظر هنهنا في أمر هذه الوصلة نجدها لا تتكون ببساطة بمجرد التصاق سطحي نوعي شبه موصل السيليكون p ، n ، وذلك لعدة أسباب منها ما هو بسيط ومنها ما هو معقد وصعب ونوجز بعضها فيما يلي:

فمن الأسباب البسيطة لعدم اكتمال الوصلة بالاتصاق الميكانيكي المباشر عدم انتظام استواء السطوح ، فتكون عدد نقاط الالتصاق التام قليلة جداً ، وبذلك تختزل شدة التيار المار عبر الوصلة بدرجة كبيرة لعدم مروره عبر سطح الالتصاق بأكمله . إضافة إلى ذلك فإن سطح السيليكون المعرض للهواء الجوي يتغطى بطبقة رقيقة من أكسيد السيليكون وتعرف هذه بالأكسدة الذاتية وهي شديدة العزل الكهربائي فتمنع مرور التيار .

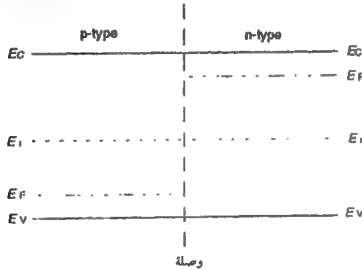
أما الأسباب المعقدة فتكمن في الروابط الكيميائية السائبة عند السطوح فالبؤرة النقية من السيليكون لا تعاني بداخلها مشكلة عدم توازن الروابط التساهمية نظراً لتمام توزيع ذرات الجوار القريب بالنسبة لأي ذرة معينة في الشبكة . أما ذرات السطح فإنها تفتقد لمثل هذا التماثل فيتولد عن ذلك أنواع غريبة من الروابط عند سطح البؤرة ، وهذه بدورها تلتصق ببعض الشوائب من الهواء مع احتمال تكون روابط سائبة . كل ذلك يؤدي إلى مشاكل فنية صعبة قد تفقد بها الوصلة خاصيتها .

في الواقع يصنع الثنائي بحيث تتكون الوصلة داخل جسم شبه الموصل ، بعيداً عن السطح ، شكل (٤-٥) . يمكن التعرف على ذلك بشيء من التفصيل في معرض الحديث عن طرق تصنيع أشباه الموصلات ونباتقها كما هو موضح بالفصل الرابع .



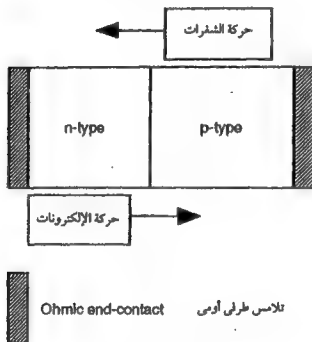
شكل (٤-٥) تصنيع الترانزستور

إذا كان التصاق سطحي شبه الموصل p ، n أمرا بالغ الصعوبة من الناحية الفنية فإن التصاق مخططى مستوي طاقتيهما على الورق يبدو أمرا سهلا ونحصل به على شكل (٥-٥)، إلا أن المخطط الناتج يصبح غير مقبول من وجهة نظر الفيزياء وذلك لعدم اتصال مستوي فرمي E_F على جانبي p ، n وتولد هوة سحيقة بين مستوييهما عبر الوصلة، وبذلك يصبح مخطط الطاقة الممثل بشكل (٥-٥) مخططا غير سوى.



شكل (٥-٥) مخطط خطأ لناسيب الطاقة، غير مقبول فيزيائيا

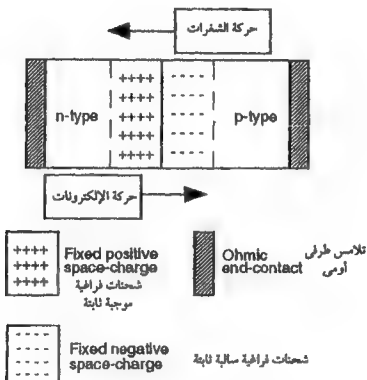
يمثل شكل (٦-٥) وصلة pn نموذجية تفصل بين جزئى شبه موصل السيليكون، احدهما من النوع p والآخر من النوع n . يعرف الخط الفاصل بين النطاقيين المختلفين بالوصلة الميتالورجية (الفلزية). ويصبح لدينا سيليكون ذات وفرة في الشغرات الموجبة مع ندرة في الإلكترونات في تلامس مع سيليكون ذات وفرة في الإلكترونات السالبة. تميل الشحنات المختلفة إلى إعادة الاتحاد فيما بينها عبر الوصلة ولا يقتصر الأمر على ذلك بل تنشأ هناك ظروف مناسبة لانتشار حاملات الشحنة الكهربية. حيث تميل كثير من الشغرات بالجانب الأيمن من الوصلة في شكل (٦-٥) إلى الانتشار نحو الجانب الأيسر وكذلك تفعل الإلكترونات في الاتجاه المضاد.



شكل (٦-٥) وصلة pn نموذجية

فى هذا النموذج المبسط للوصلة نحتاج إلى أن نفرق بين حاملات الشحنة من إلكترونات وشغرات موجبة من جهة وبين المانحات والمستقبلات المسؤولة عنها من جهة أخرى، وهذه تمثل عناصر مثل الزرنيخ والبورون تطعم بها شبكة السيليكون فثبتت عند مواضع معينة بداخلها. هذه المانحات والمستقبلات لا تتحرك إلا إذا تم تسخين شبه الموصل وتنشيط ظاهرة الانتشار. غير أن حاملات الشحنة الناتجة منها تتطلق فى حرية ويسر. وحين تنتشر الشغرات الموجبة تتجه نحو يسار الوصلة الفلزية لتعيد اتحادها

بالإلكترونات الموجودة في تلك الناحية فإنها تترك خلفها مستقبلات من أيونات سالبة الشحنة، وكذلك حين تنتشر الإلكترونات نحو يمين الوصلة تترك خلفها مانحات موجبة الشحنة. لا تستمر ظاهرة الانتشار إلى ما لا نهاية حيث تعمل هذه الأيونات الثابتة بنوعيتها على جذب حاملات الشحنة التي تحاول الانتشار بعيدا. تسعى المستقبلات إلى الاحتفاظ بالشفرات كما تسعى المانحات إلى الاحتفاظ بالإلكترونات. فيعمل المجال الكهربى المتولد من الشحنات الثابتة على أن يبطئ من عملية الانتشار ويصل بها إلى حالة الاستقرار، ويبين شكل (٧-٥). حالة الاستقرار الذى تنول إليه الوصلة وفيه تبين المنطقة بين الحطين المتقطعين الرقعة التى غادرتها حاملات الشحنة الحرة تاركة خلفها شحنات عارية تعرف بشحنات الفراغ، ومن ثم تعرف هذه المنطقة بمنطقة الشحنة الفراغية أو بمنطقة النضوب أو منطقة الاستنفاد، وذلك لكونها منطقة نضوب أو استنفاد الشحنات الحرة. أما بعيدا عن منطقة الوصلة pn تظل مادة شبه الموصل متعادلة.



شكل (٧-٥) توزيع الشحنات داخل وصلة pn مثالية عند حالة الاتزان الحرارى

فى حالة الاستقرار أو الاتزان تنعدم محصلة التيار الكهربى عبر الوصلة، على الرغم من تولد تيارات صغيرة فى كلا الاتجاهين، وتتلاشى بالتقائها مع تيارات انتشار معاكسة. وهكذا يكون هناك سريان لتيارات كهربية عبر الوصلة pn طوال الوقت، إلا أن محصلة التيار المار تكون صفراً.

وبفرض أن محصلة كثافة تيار الشفغات J_p ، ومحصلة كثافة تيار الإلكترونات J_n فإنه يمكن صياغة معادلة وصفية على الصورة :

$$J_p = J_p(\text{drift}) + J_p(\text{diffusion}) = 0 \quad (5-1)$$

تقدر وحدات J بالأمبير / سم²، (A/cm²).

يتولد تيار الانسياب $J(\text{drift})$ من تأثير المجال الكهربى عند الوصلة كما يتولد تيار الانتشار من التدرج فى تركيز الشوائب.

يمكن تمثيل العلاقة السابقة فى صورة رياضية بالمعادلة :

$$J_p = \mu_p p \frac{dE_F}{dx} = 0 \quad (5-2)$$

حيث تمثل μ_p التحركية، p تركيز الشفغات الموجبة، E_F طاقة فرمى الذاتية على طول الإحداثى السينى x .

وبالنسبة لحاملات الشحنة السالبة تكون كثافة التيار.

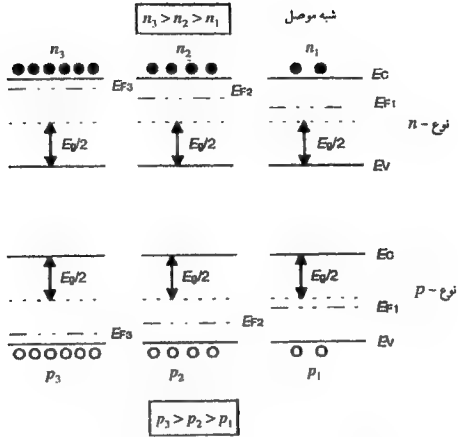
$$J_n = \mu_n n \frac{dE_F}{dx} = 0 \quad (5-3)$$

وأى من العلاقتين تعطى :

$$\frac{dE_F}{dx} = 0 \quad (5-4)$$

يعنى ذلك أنه فى اتجاه الإحداثى السينى تثبت قيمة طاقة فرمى ويمثل بخط أفقى فى مخطط الطاقة، ذلك عند انعدام محصلتى تيار الشفغات وتيار الإلكترونات عبر منطقة النضوب فى الوصلة pn .

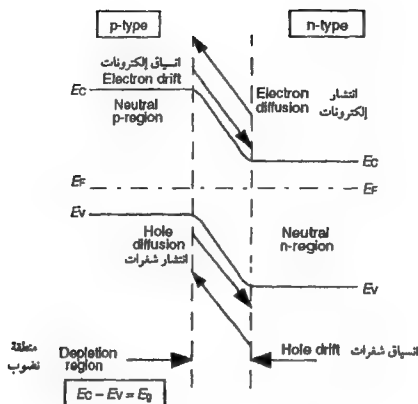
بداخل أى شبه موصل إياً كان نوعه p أو n فإن طاقة فرمى E_F تشغل مستوى واحد فقط، شكل (5-8). وعند تكون وصلة من شبهى موصل p ، n وجب أن يكون



شكل (٨-٥) تغير موضع طاقة فيرمي مع تركيز حاملات الشحنة في نوعي شبه الموصل n ، p

هناك أيضا مستوى واحد وثابت لطاقة فيرمي يمتد من المنطقة p إلى المنطقة n عبر الوصلة pn شكل (٩-٥). بذلك يتضح أنه للحصول على مخطط سوى لمناسيب طاقة الوصلة pn يجب إقحام مستوى طاقة فرمي في شبه الموصل p ، n عند مستوى واحد ثابت وذلك بدلا من توحيد موضعي نطاقي التكافؤ ونطاق التوصيل كما ورد من قبل في شكل (٥-٥) كمخطط غير سوى لمناسيب الطاقة عند الوصلة. بعد توحيد مستويي طاقة فيرمي لنوعي شبه الموصل تترك مسافة أفقية فاصلة بينهما لتمثل منطقة النضوب (الوصلة) ثم يتم وصل نطاق التوصيل ونطاق التكافؤ داخل هذه المنطقة، مع مراعاة تساوي فجوة الطاقة بين نطاقي التوصيل والتكافؤ في نوعي شبه الموصل. بذلك نحصل على المخطط السوي لمناسيب طاقة الوصلة pn .

سؤال: حاول رسم مخطط مناسب الطاقة للوصلات المركبة (npn) و (pnp) ، هذه الوصلات المركبة هي نبائط شبه موصل وتعرف بالترانزيستور.



شكل (٥-٩) مخطط مناسب الطاقة في الوصلة pn

في شكل (٥-١٠) يلاحظ وجود تيارى الانتشار المتضادين وهما يسريان طوال حياة الوصلة غير أن محصلتهما تساوى صفراً طالما كان هناك استقرار (اتزان) حرارى. إلا أنه عند غياب هذا الاتزان ووجود فرق جهد كهربي بين طرفي النسيطة يتغلب أحد هذين التيارين على الآخر ونحصل على تيار محصل واحد فقط. فكما يتضح من الشكل أن الإلكترونات وهى تنتشر من القطاع n إلى القطاع p تصطدم بحاجز جهد يميل على نطاقى التوصيل فى القطاعين. والإلكترونات الحرارية القليلة المتولدة فى القطاع p عند طبقة قريبة من الوصلة تميل إلى أن تنزلق فى يسر إلى أسفل حاجز الجهد المائل، وحين يكون هناك دفع لها فإنها تغوص فى الوصلة.

من جهة أخرى نجد عند نطاق التكافؤ أن الشغرات الموجبة التى تنتشر من القطاع p إلى القطاع n تواجه هى الأخرى حاجز جهد مناظر. ومن اعتبارات الطاقة يكون حاجز جهد الشغرات مضاداً لحاجز جهد الإلكترونات، وكذلك النذر اليسير من الشغرات المتولدة فى القطاع n عند طبقة قريبة من الوصلة تُعجل حركتها فى الاتجاه من

القطاع n إلى القطاع p بفعل المجال الكهربى الناشئ عن الشحنة الفراغية فى منطقة النضوب .

ونستعرض فى البند التالى هذه النقاط بشئ من التفصيل .

(٢-٥) ارتفاع حاجز جهد الوصلة pn

pn Junction Barrier Height

يقصد بحاجز الجهد المواجه للشحنات الحرة، الفرق بين مستويى نطاقى التوصيل فى نوعى شبه الموصل، كما يبينه شكل (١٠-٥). يرمز له بالرمز V_{bi} ، وقد يعرف بالجهد المبيت للوصلة pn ويعطى بالعلاقة :

$$E_i = q V_{bi} \quad (5-5)$$

حيث تمثل E_i المستوى الذى تحتله طاقة فيرمى فى شبه الموصل الذاتى، ومن ثم يطلق عليه مستوى طاقة فيرمى الذاتى. ويقع عند منتصف المسافة بين مستويى نطاق التوصيل والتكافؤ، حيث تُعطى قيمة الطاقة qV_{bi} ، بحاصل جمع قيمتى الطاقة qV_n ، qV_p .

ومن الشكل نجد أنه فى نطاق التكافؤ :

$$qV_p = - (E_i - E_f) \quad (5-6)$$

وحيث إن تركيز الشغرات يُعطى بالعلاقة :

$$p = n_i \exp \left(\frac{E_f - E_i}{kT} \right) \quad (5-7)$$

حيث تمثل n_i تركيز حاملات الشحنة فى شبه الموصل الذاتى
∴ يمكن الحصول على :

$$V_p = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} \quad (5-8)$$

وذلك بافتراض التأين الكامل لمستوى الذرات المتقبلة عندها. يكون تركيز الشغرات الموجبة p مساويا لتركيز الذرات المتقبلة N_A .

بالمثل نجد في نطاق التوصيل :

$$qV_n = - (E_i - E_f) \quad (5-9)$$

ويعطى تركيز الإلكترونات بالعلاقة :

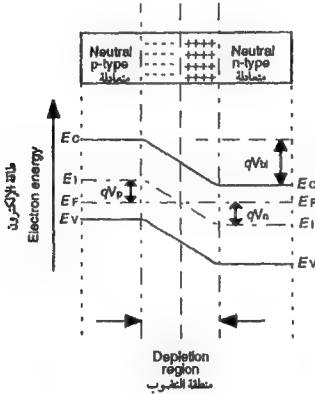
$$n = n_i \exp \left(\frac{E_f - E_i}{kT} \right) \quad (5-10)$$

ومنها :

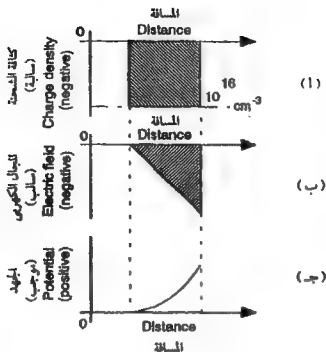
$$V_n = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D}{n_i} \quad (5-11)$$

وذلك أيضا بافتراض التآين التام لمستوى الذرات المانحة وعندما يكون تركيز الإلكترونات n مساويا لعدد الذرات المانحة N_D ، وعليه تصبح :

$$|V_{bi}| = |V_n| = |V_p| = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (5-12)$$



شكل (١٠-٥)
مخطط الطاقة عند الاتزان الحراري



شكل (١١-٥)

الحل للبياني لمعادلة بواسون

مثال ١-٥ :

احسب الجهد الداخلى المبني لوصلة pn إذا كانت تركيزات الإشابة هي $10^{18}/\text{cm}^3$ ذرة متقبلة فى شبه الموصل p ، $10^{15}/\text{cm}^3$ ذرة مانحة فى شبه الموصل n .

الحل :

بالتعويض المباشر فى النتيجة النهائية لقيمة حاجز الجهد نجد :

$$V_{bi} = (0.0259) \ln \left[(10^{18} \times 10^{15}) / (1.4 \times 10^{10})^2 \right].$$

$$= 0.76 \text{ V.}$$

هذه القيمة لا تعتبر معياراً ثابتاً للوصلة pn كما جرى عليه العرف بل تتوقف على درجة إشابة المناطق p ، n فى النسيطة. والآن وقد بدأنا التعرف على حاجز الجهد بين نوعى شبه الموصل، صار إلزاماً علينا أن نؤمن النظر فى صور المجال والجهد الكهربى عبر الوصلة.

(٣-٥) تقريب النضوب والمجال الكهربى والجهد

Depletion Approximation, Electric Field and Potential

يرتبط المجال الكهربى وكذلك الجهد الكهربى عبر الوصلة، ارتباطا وثيقا بكثافة شحنة الفراغ المركزة فى طبقة النضوب فى منطقة الوصلة pn . بذلك تحدد الشحنات الوحيدة التى سوف تأخذ فى الحسبان بتلك الشحنات العادية لأيونات الشوائب داخل طبقة النضوب أما باقى أجزاء شبهى الموصل p ، n فهى فى حالة تعادل وخمود.

والعلاقة التى تربط بين كل من المجال الكهربى وكثافة الشحنة الكهربائية تتميز بأهمية قصوى عند دراسة فيزياء أشباه الموصلات والنظرية الكهرومغناطيسية وتعرف بمعادلات ماكسويل. أحد هذه المعادلات :

$$\frac{\partial \epsilon_x}{\partial x} + \frac{\partial \epsilon_y}{\partial y} + \frac{\partial \epsilon_z}{\partial z} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (5-13)$$

وهى معادلة تفاضلية ثلاثية الأبعاد، قد تختصر لبعد واحد فى الاتجاه السينى مثلا للتبسيط. تمثل ϵ شدة المجال، ϵ_0 سماحية الفراغ، وتمثل ρ كثافة الشحنة الكهربائية. وفى مجال أشباه الموصلات فإنها تمثل كثافة شحنة الفراغ داخل طبقة النضوب. هذه المعادلة هى صورة لقانون جاوس الذى يربط بين كل من المجال الكهربى والجهد الكهربى بصورته التالية :

$$\epsilon = - \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z} \right) \quad (5-14)$$

بذلك تصبح العلاقة بين الجهد الكهربى وكثافة الشحنة :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = - \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (5-15)$$

تعرف هذه العلاقة بمعادلة بواسون. عندما تنعدم الشحنة $\rho=0$ تصبح :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (5-16)$$

وتسمى بمعادلة لابلاس.

عند دراسة أشباه الموصلات بهذه المعادلات يلزم استبدال سماحية الوسط ϵ بسماحية الفراغ ϵ_0 وتصبح العلاقة (5-13) على الصورة

$$\frac{\partial \epsilon_x}{\partial x} + \frac{\partial \epsilon_y}{\partial y} + \frac{\partial \epsilon_z}{\partial z} = \frac{\rho}{\epsilon_0 k_y} \quad (5-17)$$

حيث تمثل K_y السماحية النسبية للوسط أو ثابت العزل للوسط.

لترجمة هذه المعادلات الرياضية المجردة إلى فيزياء بسيطة ملموسة نستعرض شكل (١١-٥) وفيه يبين الشكل (أ) توزيعاً مستطيلاً لكثافة الشحنة كما يظهرها شبه موصل ما في ظروف معينة من شحنة سالبة بكثافة $10^{16} / \text{cm}^3$ ذرة إشابة. غير أن هذه الخصوصية لا تعنى شيئاً عند مناقشة هذا الأمر. لاستنتاج شدة المجال الكهربى بدلالة الموضع علينا أن نجري التكامل على كثافة الشحنة بالعلاقة :

$$\epsilon_x = \frac{1}{\epsilon_0 K_y} \int \rho_x dx \quad (5-18)$$

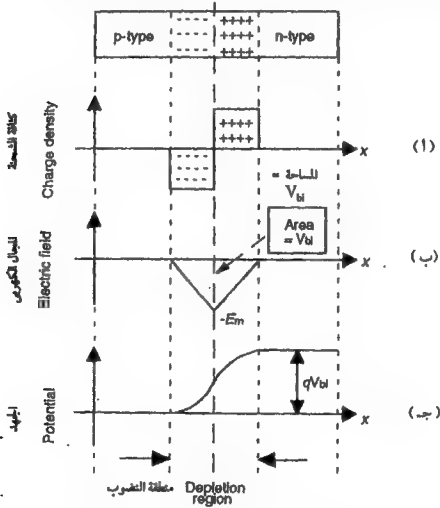
وذلك في اتجاه الإحداثى السينى فقط. ودون الخوض فى عمليات رياضية يمكن تمثيل هذا التكامل بالشكل (ب). لاستنتاج قيمة الجهد لجرى التكامل على شدة المجال تبعاً للعلاقة :

$$V = - \int \epsilon_x dx \quad (5-19)$$

ونحصل بذلك على الشكل (ج).

هذه الكميات الفيزيائية المختلفة تتغير داخل طبقة النضوب عبر الوصلة pn بالمنحنيات الواردة فى شكل (٥-١٢). نرى فى الشكل وجود شبه موصل p يسار الوصلة الميتالورجية وشبه الموصل n على يمينها، فتكون الشحنات المكشوفة السالبة على يسار الوصلة والموجبة على اليمين منها. فى الحقيقة يستمر تناقص الشحنات المكشوفة، موجبة كانت أم سالبة كلما بعدنا عن الوصلة وتضمحل بنهاية ذيلية داخل أشباه الموصلات بعيداً عن حدود الوصلة، خلال منطقة انتقال صغيرة للغاية حيث تنعدم الشحنات بعدها فى المنطقة المتعادلة من شبه الموصل.

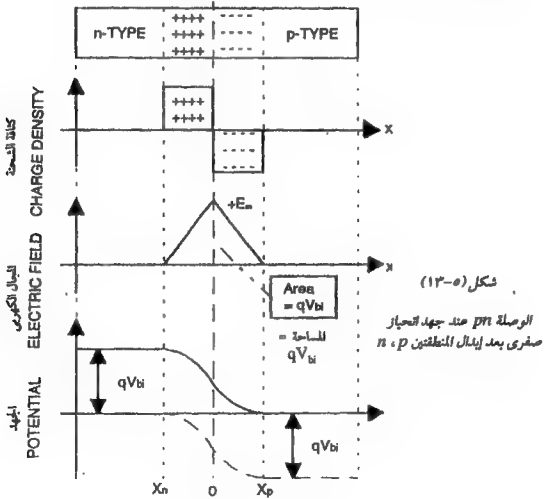
النموذج الموضح للوصلة pn في الشكل يبين انتقالاً مفاجئاً للشحنات من داخل الوصلة، حيث طبقة النضوب وفيها كثافة شحنة عالية إلى خارج الوصلة، حيث شبه الموصل المتعادل وفيها تعدد كثافة الشحنة دون إظهار لمنطقة الاضمحلال. هذه صورة تقريبية مقبولة لطبقة النضوب وهو ما يطلق عليه تقريب النضوب. بداخل هذه المنطقة يتشكل كل من كثافة الشحنات الكهربائية المختلفة والمجال الكهربى والجهد الكهربى الناتجين عن الشحنات بالمنحنيات التى بينها شكل (٥-١٢). إذا تحركنا بداخلها نحو اليمين من (p) إلى (n) نجد أن تكامل الشحنات السالبة يعطى شدة للمجال بنفس إشارة الشحنة، حيث ينخفض إلى ما تحت الصفر فى الاتجاه السالب حتى نصل إلى حد الوصلة الميتالورجية لنجد شحنات موجبة، يتغير بتأثيرها شدة المجال صوب الاتجاه المعاكس حتى يعود مرة أخرى إلى الصفر (القيمة الابتدائية) وذلك عند النقاء الحافة البعيدة لكثافة الشحنة الموجبة مع شبه الموصل (n) وتعلم بعده الشحنات.



شكل (٥-١٢) الوصلة pn عند جهد التحيز صفري

من تكامل المجال الكهربى نحصل على دالة الجهد سبب اختلاف الإشارة بين المجال والجهد نجد أن المجال السالب يؤدي إلى جهد موجب ونظرا لكون المجال سالبا على طول خط طبقة النضوب داخل الوصلة، يصبح الجهد موجبا داخل هذه المنطقة، مع ملاحظة أنه يمكن اختيار أى موضع كمرجع للقيمة الصفرية لدالة الجهد.

قد نستبدل موضعى شبهى الموصل عبر الوصلة فيكون النوع n على يسار الوصلة الميتالورجية والنوع p على يمينها. بذلك نحصل على منحنيات كثافة الشحنة والمجال والجهد كما يبينها شكل (١٣-٥). للمقارنة، نجد فى شكل (١٢-٥) أن المجال السالب يؤثر فى الاتجاه السالب للمحور السينى، فيعمل على سحب الشفترات ناحية منطقة p ودفع الإلكترونات ناحية منطقة n . بتعبير آخر يميل المجال فى هذه الحالة إلى استبقاء نوعى الشحنتين الحرتين كل فى مستقرها الطبيعى من شبه الموصل، هذا أمر طبيعى يتفق مع حالة الاتزان الناتج عن تأثير المجال فيتوقف أى تحرك إضافى للشحنيات الحرة.



ونشير هنا إلى أن موضع الإحداثى العصادى لمنحنى المجال يعطى مقدار شدة المجال، أما إشارته على هذا الإحداثى فإنه يبين اتجاه المجال عبر الإحداثى السينى، على ذلك فإن المجال فى شكل (٥-١٣) موجب القيمة والاتجاه فيتجه صوب الاتجاه الموجب للمحور السينى.

تكون بذلك القوة المؤثرة على الإلكترونات ناحية اليسار فيحتفظ بها شبه الموصل n ، أما الشفرات فيدفعها هذا المجال ناحية اليمين جهة شبه الموصل p وهى نفس النتيجة المستخلصة من شكل (٥-١٢).

يبقى الحديث عن دالة الجهد فى شكل (٥-١٣) حيث تم تعريف قيمة الصفر للجهد عند الموضع $x = x_0$ ، إلا أن التكامل بصورته المعتادة يولد المنحنى المتقطع. ونفوه بأنه ليس هناك أى فرق بين هذين المنحنيين، فما يهمنا من الجهد هو مقدار التغير الحادث فيه، أى فرق الجهد عبر الوصلة فقد يختار أناس آخرون الجهد الصفرى ليكون عند الوصلة الميتالورجية. هكذا نكرر ونؤكد أن تحديد موضع الجهد الصفرى أمر اختياري بحث.

ومن طرائف هذه المنحنيات باى من الشكلين (٥-١٢) أو (٥-١٣) أن مساحة المثلث الناتج من تغير شدة المجال عبر طبقة النضوب داخل الوصلة يعطى فرق الجهد V_{bi} بين طرفى الوصلة وهذه القيمة قد سبق تعريفها بحاجز الجهد. وقبل أن ننهى هذا البند هناك نقطتان نود توضيحهما :

١- الوصلة pn التى نحن بصدها، تعرف بالوصلة شديدة الانحدار أو الفعائية. يتغير فيها تركيز الإشابة فجأة من النوع p إلى النوع n عند حد الوصلة الميتالورجية. غير أن هذا التغير الفجائى فى تركيز الإشابة غير مستحب. ويفضل عليه التغير الهادئ المتلرج فى تركيز الإشابة. هذا بدوره يؤدي إلى تكوين وصلة مدرجة، لها تطبيقات كثيرة وخاصة فى مجال الترانزستور ثنائى الأقطاب.

٢- الوصلة أحادية الجانب المبتورة، تتميز بتركيز إشابة عال جداً فى ناحية من الوصلة بالمقارنة بالناحية الأخرى، وسيرد الحديث عنها فيما بعد.

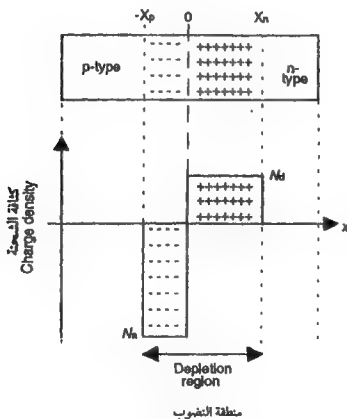
قد نشعر بالارتياح فترة وجيزة لأننا قد تعرفنا على بعض ما يحدث داخل الوصلة pn ، الصغيرة جداً فى مسأرها، الثرية فى خواصها الفيزيائية دون خوض يذكر فى معادلات رياضية معقدة. غير أننا نجد أنفسنا مضطرين إلى ركوب الصعاب والتعامل مع

بعض المعادلات الرياضية المزرشة بـرموزها المختلفة كى نتعرف بصورة أعمق على ما
يجرى فى دهاليز هذه الوصلة التى لا تدرکها العين !!

(٤-٥) الصيغ الرياضية لعناصر الوصلة Mathematical Formulation

تقتضى عملية إعادة الالتحام بين الإلكترونات والشفرات المكونة لشحنة الفراغ فى
منطقة النضوب- أن تبقى هذه المنطقة متعادلة كهربيا، ففيها يتعادل إلكترون واحد مع
شفرة واحدة. فى شكل (١٤-٥) وجب أن تكون كمية الشحنات المكشوفة الموجبة على
الجانب n من الوصلة المتأورجية مساوية لكمية الشحنات المكشوفة السالبة على الجانب

p من الوصلة. غير أن الشكل يظهر طولين مختلفين لامتدادى هاتين الشحنتين على
الجانبين؛ وذلك تحقيقا لفرض اختلاف تركيزى الإشبائتين على الناحيتين. وبوجه عام،
يمكن التعبير عن تعادل منطقة شحنة الفراغ داخل طبقة النضوب بالصورة الرياضية
التالية :



شكل (١٤-٥) تعادل شحنات الفراغ فى طبقة النضوب

$$N_A x_p = N_D x_n \quad (5-20)$$

هذه العلاقة برغم بساطتها مفيدة جدا، إذ تخبرنا بأن منطقة الإشابة العالية التركيز عند أحد جانبي الوصلة تتميز بطبقة نظوب ضيقة. ويصبح عرض طبقة النظوب الكلية W مساويا لمجموع عرض طبقتي النظوب x_p ، x_n في شبهي الموصل p ، n أى أن:

$$W = x_p + x_n \quad (5-21)$$

إذا تم اختيار نقطة الأصل مكان الوصلة الميتالورجية فإن معادلة بواسون، معادلة (5-15) تعطى:

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = \frac{q N_A}{\epsilon_{si}} \quad (5-22)$$

عند $-x_p < x < 0$

كما تعطى:

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = - \frac{q N_D}{\epsilon_{si}} \quad (5-23)$$

عند $0 < x \leq x_n$ ، حيث:

$$\epsilon_{si} = \epsilon_0 K_s \quad (5-24)$$

تمثل K_s السماحية النسبية لشبه الموصل وهي للسيليكون 11.9.

في هذه المعادلات علينا أن نتوخى الحذر في التعامل مع الإشارات. في المعادلة (5-22) يكون التفاضل الثاني للجهد موجبا لارتباطه بالشحنات المكشوفة السالبة للمتقبلات (N_A)، بينما يكون سالبا في المعادلة (5-23) لارتباطه بالشحنات المكشوفة الموجبة للمانحات. بإجراء التكامل على المعادلتين السابقتين نحصل على المجال الكهربى. فمن تكامل المعادلة (5-22) نجد:

$$\epsilon_p(x) = - \frac{dV}{dx} = - \frac{q N_A x}{\epsilon_{si}} + C_1 \quad (5-25)$$

تمثل E_p شدة المجال الكهربى جهة p من الوصلة، C_1 ثابت التكامل ولتعيينه نطبق الشروط الابتدائية وهى

$$E_p(x) = 0 \quad \text{يكون} \quad x = -x_p \quad \text{عند}$$

$$\therefore C_1 = - \frac{q N_A x_p}{\epsilon_{si}} \quad (5-26)$$

بالتعويض فى المعادلة (5-25) نجد :

$$E_p(x) = \frac{q N_A}{\epsilon_{si}} (x + x_p) \quad (5-27)$$

بالمثل، من تكامل المعادلة (5-23) نحصل على شدة المجال $E_n(x)$ جهة شبه الموصل n من الوصلة، فتكون :

$$E_n(x) = \frac{q N_D}{\epsilon_{si}} (x - x_n) \quad (5-28)$$

راينا فى التكامل الوصفى شكلى (٥-١٢ ، ١٣) أن النهاية العظمى لشدة المجال E_m تقع عند موضع الوصلة الميتالورجية ($x=0$). بتطبيق ذلك على التيجتين $E_p(x)$ ، $E_n(x)$ نجد أن :

$$E_m = - \frac{q N_D x_n}{\epsilon_{si}} = - \frac{q N_A x_p}{\epsilon_{si}} \quad (5-29)$$

للحصول على الجهد الكهربى كدالة للموضع لجرى التكامل على معادلتى المجالين $E_p(x)$ ، $E_n(x)$. يقول ثابت التكامل فيها إلى الصفر إذا اعتبرنا أن الجهد الصفرى يقع عند خط الوصلة الميتالورجية ($x=0$). بذلك يعطى تكامل المعادلة (5-27).

$$V_p(x) = \frac{q N_A x^2}{2 \epsilon_{si}} + \frac{q N_A x_p}{\epsilon_{si}} \quad (5-30)$$

يبقى الجهد ثابتا فى المدى $x \leq -x_p$ ويساوى قيمته المحسوبة عند $x = -x_p$ من العلاقة :

$$V_p(-x_p) = - \frac{q N_A x_p^2}{2 \epsilon_{si}} \quad (5-31)$$

بالمثل ، من المعادلة (5-28) يمكن حساب قيمة الجهد عند الموضع $x = x_n$ لتكون :

$$V_n(x_n) = - \frac{q N_D x_n^2}{2 \epsilon_{sl}} \quad (5-32)$$

يصبح فرق الجهد V_{bi} عبر الوصلة وهو ما عرف بحافظ الجهد، على الصورة :

$$V_{bi} = V_n - V_p = \frac{q}{2 \epsilon_{sl}} (N_A x_p^2 + N_D x_n^2) \quad (5-33)$$

غير أنه يمكننا حساب قيمة حائط الجهد V_{bi} بدلالة النهاية العظمى لشدة المجال E_m والعرض الكلي W لطبقة النضوب بالاستعانة بأى من الشكلين (٥-١٢ ، ١٣).
ذلك بحساب مساحة المثلث الذى قاعدته W وارتفاعه E_m لنحصل على :

$$V_{bi} = \left| \frac{E_m W}{2} \right| \quad (5-34)$$

للحصول على صيغة رياضية لعرض طبقة النضوب الكلية W يحتاج الأمر إلى تعيين قيمتي x_p ، x_n والتعويض بهما فى المعادلة (5-21). بالاستعانة بعلاقة تعادل الشحنات ، معادلة (5-20) ، يمكن إعادة صياغة المعادلة (5-33) كى تصبح على الصورة :

$$V_{bi} = \frac{q}{2 \epsilon_{sl}} N_A^2 x_p^2 \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \quad (5-35)$$

أو :

$$V_{bi} = \frac{q}{2 \epsilon_{sl}} N_D^2 x_n^2 \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \quad (5-36)$$

تعطى المعادلة (5-35) قيمة x_p عرض طبقة النضوب فى الجهة p من الوصلة.:

$$x_p = \frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{2 \epsilon_{sl} N_A N_D}{q (N_A + N_D)}} \quad (5-37)$$

كما تعطى المعادلة (5-36) قيمة x_n ، عرض طبقة النضوب فى الجهة n من الوصلة :

$$x_n = \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{2 \epsilon_{sl} N_A N_D}{q (N_A + N_D)}} \quad (5-38)$$

من هاتين النتيجةين نحصل على

$$W = x_p + x_n = \sqrt{\frac{2 \epsilon_{si} (N_A + N_D) V_{bi}}{q N_A N_D}} \quad (5-39)$$

مثال 5-5 :

احسب الجهد الداخلى المبيت (جهد التلامس)، وكذلك عرض طبقة النضوب لوصلة pn مبتورة إذا كانت درجات الإشابة الذرية هي $10^{17} / \text{cm}^3$ فى شبه الموصل p ، $10^{15} / \text{cm}^3$ فى شبه الموصل n .

الحل :

لحساب جهد التلامس نستخدم المعادلة :

$$V_{bi} = \frac{k T}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

$$= (0.026) \ln \left\{ (10^{17} \times 10^{15}) / (1.4 \times 10^{10})^2 \right\} = 0.7 \text{ V}$$

لحساب عرض طبقة النضوب نستخدم المعادلة (5-39) :

$$W = \sqrt{\frac{2 \epsilon_{si} (N_A + N_D) V_{bi}}{q N_A N_D}}$$

$$= \sqrt{\frac{(2) (8.854 \times 10^{-14} \times 11.9) (1.01 \times 10^{17}) (0.7)}{(1.6 \times 10^{-19}) (10^{17}) (10^{15})}}$$

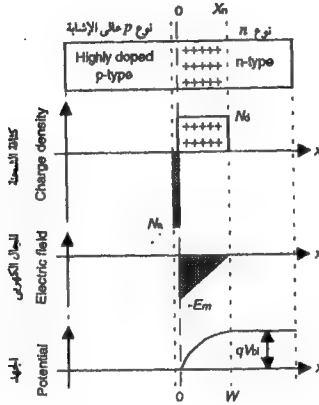
$$= 2.65 \times 10^5 \text{ cm} = 0.965 \text{ } \mu\text{m}$$

يبين لنا هذا المثال قيمة عرض طبقة النضوب فى ثنائى شبه الموصل وتقدر بحوالى واحد ميكرون أى 10^{-6} m

(5-5) الوصلة pn أحادية الجانب

One-Sided Abrupt pn Junction

تتميز هذه الوصلة -كما ذكر من قبل- بدرجة إشابة عالية فى جهة واحدة فقط من جهتى الوصلة. يبين شكل (١٥-٥) نموذجاً لها وتوزيعاً لكثافة الشحنة وللجال الكهربى والجهد فيها بطريقة التكامل الوصفى بالرسم. ونظراً لزيادة درجة إشابة الذرات المتقبلة عنها للذرات المانحة فلقد افترض أن شحنة الفراغ كلها سوف تقبع ناحية للمانحات فى الجهة n من الوصلة.



شكل (١٥-٥) الوصلة pn المتبصرة وحيدة الجانب

فى واقع الامر تكون هناك طبقة نضوب ضيقة جداً تمتد داخل الجهة p من الوصلة إلا أنها لا تظهر فى هذا الرسم التخطيطى، وعليه لا يظهر أثر للمجال الكهربى المناظر له فى الجهة p (هذا على الرغم من وجوده)، كذلك تم حذف الجزء التناهى فى الصغر للجهد الكهربى الموجود جهة p .

هذا التبسيط في الرسم هو في الحقيقة تقريب يؤخذ به عند دراسة مثل هذه الوصلة. إضافة إلى ذلك هناك تقريب حسابي نجريه على المعادلات السابقة بفرض الوصول إلى خصائص هذه الوصلة من المعادلة

$$x_n = \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{2 \epsilon_{si} V_{bi} N_A N_D}{q (N_A + N_D)}} \quad (5-40)$$

باعتبار $N_A \gg N_D$ تتول هذه العلاقة إلى :

$$x_n = \sqrt{\frac{2 \epsilon_{si} V_{bi}}{q N_D}} = W \quad (5-41)$$

وذلك للوصلة المتورة أحادية الجانب.

كذلك عند تكامل المعادلة (5-23) نحصل على المجال الكهربى E_n في الجهة n على هيئة :

$$E_n(x) = \frac{q N_D x}{\epsilon_{si}} + C_2 \quad (5-42)$$

وتكون الشروط الابتدائية في هذه الوصلة هي :

$$E_n(x) = -E_m \quad \text{عند} \quad x = 0$$

$$\therefore E_n(x) = -E_m + \frac{q N_D x}{\epsilon_{si}} \quad (5-43)$$

وعند $x = W$ تكون $E_n(x) = 0$

يعطى هذا الشرط القيمة العظمى لشدة المجال بالعلاقة :

$$E_m = \frac{q N_D W}{\epsilon_{si}} \quad (5-44)$$

بالتعويض عن هذه القيمة في المعادلة (5-43) نحصل على :

$$\begin{aligned} E(x) &= \frac{q N_D}{\epsilon_{si}} (x - W) \\ &= -E_m \left(1 - \frac{x}{W}\right) \end{aligned} \quad (5-45)$$

الجهد الكهربى ينتج من تكامل هذه المعادلة :

$$V(x) = - \int_0^x E(x) dx = E_m \left(x - \frac{x^2}{2W} \right) + C \quad (5-46)$$

وبتطبيق الشروط الابتدائية، حيث $V=0$ عند $x=0$ ، يتج أن $C=0$ ونحصل بذلك على :

$$V(x) = \frac{V_{bi} x}{W} \left(2 - \frac{x}{W} \right) \quad (5-47)$$

وبعد أن قضينا هذا الوقت الطويل للتعرف على خواص الوصلة pn ، آن لنا أن نسلط عليها جهدا كهربيا انحيازيا ونرى ماذا يحدث لها.

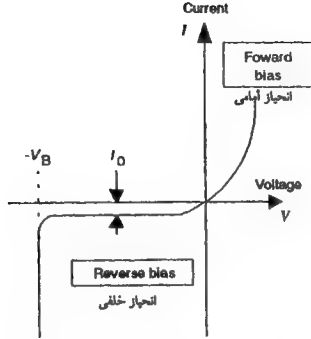
(٦-٥) تطبيق جهد انحياز على الوصلة pn

Applying Bias to the pn Junction

يقصد بجهد الانحياز فرق الجهد الكهربى بين طرفى الوصلة pn . وهناك طريقتين لتطبيق جهد الانحياز. يمكننا توصيل القطب الموجب للمصدر الكهربى بجهة شبه الموصل n أو جهة شبه الموصل p بالنسبة للوصلة ولكن، كيف يسرى التيار فى الثانى فى هاتين الحالتين؟

يبين شكل (١٦-٥) منحنى مميز للثنائى، يصف التغير فى شدة التيار الكهربى المار بالوصلة pn مع فرق الجهد عبرها. يتضح من الشكل أن التيار يسرى بسهولة فى اتجاه واحد يعرف بالانحياز الأمامى، بينما يعانى مقاومة عالية فى الاتجاه المضاد الذى يطلق عليه الانحياز العكسى.

فى الانحياز الأمامى ترتفع قيمة التيار بشدة على هيئة دالة أسية مع زيادات طفيفة فى فرق الجهد، وفى الانحياز العكسى يسرى تيار ضئيل ذو قيمة ثابتة، يستمر إلى نقطة انهيار الوصلة. والسمة الرئيسية للمنحنى المميز أن هناك تيارا يسرى ما دام هناك جهد انحياز عبر الوصلة.



V_B جهد الانهيار.
 جهد الانحياز أمامي مقداره 0.6V قد يعطى 10 mA
 I_0 عدة ميكروأمبيرات أو أقل كثيرا.

شكل (١٧-٥) منحنى $I-V$ للميز للوصلة pn

يظهر شكل (١٧-٥) نماذج للوصلة pn ومناسيب الطاقة المصاحبة لكل في حالات الاستقرار، عند غياب جهد الانحياز وفي وجود انحياز أمامي، ثم انحياز عكسي. وأهم ما يجب أن نعلمه هنا هو ما يحدث من إزاحة لشرائط الطاقة بفعل جهد الانحياز المؤثر عبر الوصلة. ولنستطرد في وصف ما يتم في تلك الحالات المختلفة.

أولا - حالة جهد الانحياز العكسي

يكون اتجاه الجهد الخارجى المؤثر (جهد الانحياز) فى نفس اتجاه الجهد الداخلى الناشئ عن شحنات الفراغ فى طبقة النضوب فتكون محصلة الجهد المؤثر عبر الوصلة pn هى مجموع هذين الجهدين. يؤدى هذا إلى مزيد من شحنات الفراغ فى طبقة النضوب فيزداد عرضها. بتعبير آخر، يعمل الجهد الذى أثرتنا به على سحب المزيد من

الشفرات من الجهة p إلى الجهة n والعكس بالعكس (وهو ما يحدث بالفعل). يستمر مثل هذا الانتقال إلى أن ينمو الجهد المبني في طبقة النضوب إلى قدر كاف لإحداث الانزلاق، وبدئياً أن يزداد الجهد عبر الوصلة بالمقارنة بحالة الاتزان الحراري؛ وذلك بسبب زيادة الشحنات ومن ثم زيادة شدة المجال.

عند فحص مخطط مناسيب الطاقة، نلاحظ زيادة كبيرة في زاوية ميل الجزء المنحدر منها عبر الوصلة. أما خارجها فتبقى مناسيب الطاقة مستوية فوق الأجزاء المتعادلة كهربياً في الثنائي، حيث لا يتولد عليها فرق جهد يذكر لما لها من قدرة جيدة على التوصيل. من ثم يكون فرق الجهد الكلي مسلطاً على طبقة النضوب، غير أن هذا لا يتحقق إذا كان شبه الموصل ذات إشابة طفيفة فتصبح له مقاومة عالية للتيار أو إذا أُمّرت تيارات كهربية عالية الشدة.

يتضح مما سبق أن جهد الوصلة pn يتعين من الجهد الخارجى مضافاً إليه الجهد المبني كما يوضحه الشكل. يرتفع بذلك حائط الجهد إلى $(V_{bi} + V_{app})$.

ولكن، ما هي عاقبة ذلك على شدة التيار الكهربي المار؟

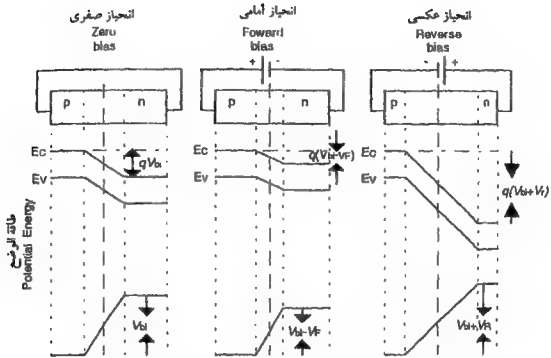
يتناقص تيار الانتشار من جراء حاجز الجهد المرتفع الذى يقوم بعصد كل من الشفرات والإلكترونات فيعوق انتشارها. أما تيار الانسياب لا يتأثر بذلك كثيراً. القلة من الإلكترونات والشفرات المتولدة حرارياً داخل طول الانتشار أو ما إلى ذلك عند حافة طبقة النضوب سوف تُجرف. فالإلكترونات المتولدة قريباً من طبقة النضوب على الجانب p من الوصلة سوف تُسحب خلالها، وكذلك الحال بالنسبة للشفرات المتولدة عند الجانب n .

إضافة إلى ذلك إذا شملت الرقعة المتسعة من طبقة النضوب بعض المراكز المولدة للشحنات مثل العيوب البلورية أو الشوائب فقد تظهر زيادة في تيار الانسياب مع زيادة الانحياز العكسى.

وفي الحالة المثلى، يكون هناك سريان لتيار عكسى ثابت عند التأثير بانحياز عكسى ما، ويطلق على هذا التيار اسم تيار التشيع العكسى.

٥-٢- حالة جهد الانحياز الأمامى :

يمثل الجزء الأوسط من شكل (٥-١٧) الوصلة pn تحت تأثير جهد انحياز أمامى. فيه للمجال الكهربي الخارجى يضاد المجال الداخلى الناشئ عن شحنات الفراغ في طبقة النضوب. وباسترجاع التفسيرات السابقة نجد أن هذا يؤدي إلى انكماش كل من عرض



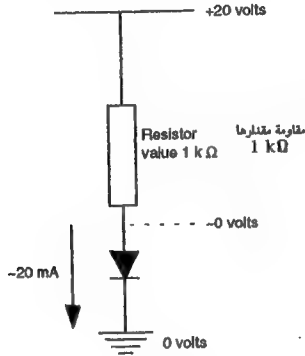
شكل (٥-١٧) تطبيق جهد الانحياز على الوصلة pn ، والترتيب من اليسار:
اتحياز صفري - انحياز أمامي - انحياز عكسي

طبقة النضوب وارتفاع حاجز الجهد المواجه لكل من الإلكترونات والشغرات واختزال فرق الجهد الكهربى عبر الوصلة، فما هو تأثير هذه التغيرات على تدفق التيار الأمامى؟ فى الواقع لن يتأثر تيار الانسياب، حيث إن أيا من شحنات الأقلية بداخل طول الانتشار عند حافة طبقة النضوب تظل مسحوبة خلالها، ويحدث التغير الكبير مع تيارات الانتشار القادرة فى حينه على الانسياب.

فى الانحياز الأمامى يتم اختزال حاجز الجهد من V_{bi} إلى $(V_{bi} - V_{app})$. بذلك نحصل على فيض هائل من تيارات الانتشار بالمقارنة بحالة الاتزان الحرارى وتظهر الزيادة المطردة بصورتها الأسية فى قيمة التيار الكهربى الأمامى عند زيادة جهد الانحياز الأمامى.

وإذا كان الأمر كذلك، ماذا يكون الحال إذا طبقنا على البسيطة جهدا كهربيا قدره 100 فولت؟ ونعلم أن الجهد الداخلى 0.6 فولت ! هل سيتفرض نطاق الطاقة ويزاح لاعلى بمقدار 99.4 فولت ؟

هذه الرؤية الظاهرية تسبب من أننا نفكر في الثنائي كمنظومة معزولة، وفي أى دائرة كهربية يصبح ضروريا توصيل مقاومة كهربية على التوالى مع النبيلة كى تُحد من شدة التيار المار بها. ففي الواقع لا يمكن تسليط انحياز أمامى بجهد 100 فولت على الثنائي؛ لأن بضع فولتات قليلة فقط فى الانحياز الأمامى سوف تسطح تماما مناسب الطاقة وعندئذ لن يكون هناك عمليا ما يحد من تدفق تيارات الإلكترونات والشواغر المنتشرة كسيل جارف. هذه الحالة مرعان ما تولد حرارة عالية (تسخين جول)، تهدم



شكل (١٨-٥) دائرة كهربية بسيطة للثنائى على التوالى مع مقاومة مناسبة

الوصلة وتدمر النبيلة. يبين الشكل (١٨-٥) ما يجب أن تكون عليه الدائرة الكهربية التى تحوى الثنائى، فتحت تأثير انحياز أمامى تكون مقاومة الثنائى صغيرة جدا بالمقارنة مع قيمة المقاومة التى تُحد من شدة التيار. بدون هذه المقاومة يحدث تسطح نطاق الطاقة مع اندفاع تيار هائل فى الوصلة *pn* يدمر النبيلة ويحرقها.

نلخص الآن ذلك السرد الطويل فى سطور قليلة .

الانحياز الأمامى :

- ١- يختزل جهد الوصلة .
- ٢- يعزز انتشار الشغرات من الجهة p إلى الجهة n عبر الوصلة pn ، وذلك مقارنة لما هو موجود فى حالة الاتزان الحرارى .
- ٣- يعزز انتشار الإلكترونات من الجهة n إلى الجهة p عبر الوصلة pn ، وذلك مقارنة لما هو موجود فى حالة الاتزان الحرارى .
- ٤- تيار الانسياب يماثل ما هو موجود فى حالة الاستقرار .
- ٥- يتدفق فيض من تيار الانتشار الأمامى .
- ٦- تذكر أن الانحياز الأمامى يتطلب توصيل القطب الموجب لمصدر الجهد بالجهة p من الوصلة .

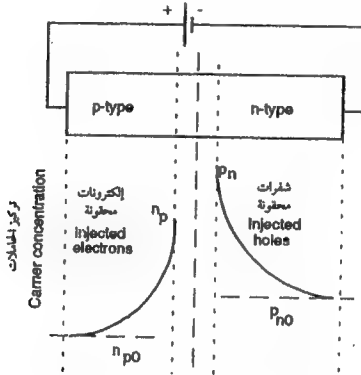
الانحياز العكسى :

- ١- يزداد جهد الوصلة .
- ٢- يختزل انتشار الشغرات من الجهة p إلى الجهة n عبر الوصلة pn ، وذلك مقارنة لما هو موجود فى حالة الاتزان الحرارى .
- ٣- يختزل انتشار الإلكترونات من الجهة n إلى الجهة p عبر الوصلة pn ، وذلك مقارنة لما هو موجود فى حالة الاتزان الحرارى .
- ٤- تيار الانسياب يماثل ما هو موجود فى حالة الاتزان .
- ٥- يسرى تيار تشيع عكسى صغير للغاية .
- ٦- تذكر أن الانحياز العكسى يتطلب توصيل القطب الموجب لمصدر الجهد بالجهة n من الوصلة .

(٧-٥) التفسير الكيفي للانحياز الأمامي

Qualitative Explanation of Forward Bias

فى الانحياز الأمامي يتم خلال طبقة النضوب حقن أعداد غفيرة من الشفرات من الجانب p إلى الجانب n وفى ذات الوقت يتم أيضا حقن أعداد غفيرة من الإلكترونات من الجانب n إلى الجانب p ، كل ذلك عبر الوصلة، تحدث بذلك طفرة لحظية لشحنات الأقلية فتسعى للتعاادل مع شحنات الأغلبية فى الجهات التى حقنت إليها، الفائض منها يأخذ فى الاضمحلال أسيًا مع المسافة، شكل (١٩-٥).



شكل (١٩-٥) حقن الشفرات والإلكترونات عبر الوصلة pn

بمرور الوقت نحصل على بضع أطوال انتشار لشحنات الأقلية بعيدا عن حافة طبقة النضوب، تنتهى هذه الشحنات إلى اتزان مع تركيز شحنات الأقلية السائلة أصلا فى المادة المتعادلة.

إذن كيف يتأتى سريان تيار ما بعد أن تعادلت شحنات الأقلية المحقونة مع بحر متلاطم الأمواج من شحنات الأغلبية المضادة بضع أطوال انتشار من حافة طبقة النضوب؟ للإجابة على ذلك علينا أن نأخذ فى الاعتبار اللامسات أو الوصلات الأومية

عند طرفي البيطة . فهي تدفع بأعداد وفيرة من الشحنات تعوض بها شحنات الأغلبية التي فقدت عند تعادلها مع شحنات الأقلية في منطقة التعادل، بعد أن كادت المنطقة تفقد تعادلها إثر عمليات الالتئام خارج طبقة النضوب . يكون مجموع أعداد الشغرات والإلكترونات المناسبة عبر الوصلات الأومية مساويا لشدة التيار الكهربى الكلى الذى ينساب فى الدائرة الخارجية .

بالرجوع إلى الشكل وإمعان النظر ناحية p من الوصلة، نجد أن معظم التيار يتم عن طريق مساهمة الإلكترونات قرب حافة طبقة النضوب، وحين نتحرك إلى منطقة التعادل ثم إلى الطرف نجد أن التيار ينتقل بمساهمة أكثر وأكثر من الشغرات إلى أن نصل عند طرفى التلامس أو الوصلة الأومية يكون التيار كليا من الشغرات. يحدث عكس هذا تماما ناحية المنطقة n من الوصلة، نجد التيار عند الوصلة الأومية عند طرفها يكون كليا من الإلكترونات.

هكذا باتت الأمور معقدة، وأصبح التعامل مع التوصيل الكهربى، ثنائى القطب كمن يتعامل مع أربع كرات فى الهواء يداعبها فى ذات الوقت . أليست لعبة شيقة ؟

(٨-٥) المعادلة المثلى للثنائى The Ideal Diode Equation

كى نحصل على صورة أكثر وضوحا للوصلة pn علينا أن نقضى بعض الوقت فى صعبة المعادلات الرياضية المستأثمة التالية !
وفيهما نفترض أن :

n_{n0}	يمثل تركيز الإلكترونات عند حالة الاتزان فى شبه الموصل n
n_{p0}	يمثل تركيز الإلكترونات عند حالة الاتزان فى شبه الموصل p
p_{p0}	يمثل تركيز الشغرات عند حالة الاتزان فى شبه الموصل p
p_{n0}	يمثل تركيز الشغرات عند حالة الاتزان فى شبه الموصل n

نعلم أنه فى شبه الموصل الذاتى يعطى تركيز حاملات الشحنة n_i من حاصل ضرب تركيزى الشغرات p والإلكترونات n من العلاقة :

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (5-48)$$

بذلك نحصل فى الجهة n من الوصلة على :

$$n_{no} \cdot p_{no} = n_i^2 \quad (5-49)$$

كما نحصل فى الجهة p على :

$$p_{po} \cdot n_{po} = n_i^2 \quad (5-50)$$

باسترجاع معادلة الجهد الميت (حافظ الجهد) V_{bi} للوصلة فإنه يمكن كتابة :

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_{no} p_{po}}{n_i^2} \quad (5-51)$$

بالتعويض من نتائج (5-49) ، (5-50) نحصل على :

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_{no}}{n_{po}} = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_{po}}{p_{no}} \quad (5-52)$$

ومنها يمكن تعيين كل من p_{po} ، n_{no} من المعادلات :

$$n_{no} = n_{po} \exp \left(\frac{qV_{bi}}{kT} \right) \quad (5-53)$$

$$p_{po} = p_{no} \exp \left(\frac{qV_{bi}}{kT} \right) \quad (5-54)$$

يمكننا الآن تطبيق هذه النتائج على الوصلة pn فى الثنائى، وذلك فى اتجاهى الانحياز الامامى والعكسى، مع مراعاة أنه فى حالة الانحياز الامامى يجب اختزال فرق الجهد عبر الوصلة إلى $(V_{bi} - V_F)$ حيث تمثل V_F قيمة الانحياز الامامى. بالنسبة للانحياز العكسى يستبدل فرق الجهد عبر الوصلة بالقيمة $(V_{bi} + V_R)$ حيث يمثل V_R الانحياز العكسى. بهذه القيم من جهد الانحياز يضطرب تركيز حاملات الشحنة وتتغير قيمتها عند الاتزان إلى قيمة أخرى عند حالة الاتزان.

فى حالة الانحياز الامامى يصبح تركيز الإلكترونات عند انعدام الاتزان n_n ويعطى بالعلاقة :

$$n_n = n_p \exp \left\{ \frac{q(V_n - V_F)}{kT} \right\} \quad (5-55)$$

إذا قلُّر للدرجة حقن شحنات الاقلية أن تبقى ضعيفة جدا بحيث لا تؤثر على حالة اتزان شحنات الاغلبية فإنه يمكن اعتبار :

$$n_n \approx n_{no} \quad (5-56)$$

$$p_p \approx p_{po} \quad (5-57)$$

بتعويض النتيجة (5-56) في المعادلة (5-55) نحصل على :

$$n_{no} = n_p \exp \left\{ \frac{q(V_{bi} - V_F)}{kT} \right\} \quad (5-58)$$

وبالتعويض عن قيمة n_{no} من المعادلة (5-53) يتج :

$$n_p = n_{po} \exp \left(\frac{q V_F}{kT} \right) \quad (5-59)$$

بطرح n_{po} من طرفى هذه النتيجة نحصل على :

$$n_p - n_{po} = n_{po} \left[\exp \left(\frac{q V_F}{kT} \right) - 1 \right] \quad (5-60)$$

حيث تم استبدال (V) بقيمة (V_F) .

بإجراء نفس هذه الخطوات يمكن الوصول إلى معادلة الشفرات وهى :

$$p_n - p_{no} = p_{no} \left[\exp \left(\frac{q V_F}{kT} \right) - 1 \right] \quad (5-61)$$

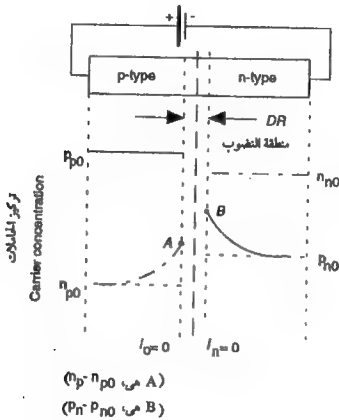
وفىها تم استبدال $(-V)$ بقيمة (V_F) .

نعطينا المعادلات (5-60)، (5-61) قيمة فائض تركيز حاملات الشحنة من الكترولونات وشفرات على التوالى وذلك فوق قيمة الاتزان الحرارى لكل منها عند حافتي

منطقة النضوب ويمثلان التقطين A ، B في شكل (٥-٢٠). ومن الأهمية بمكان معرفة أن هذا الفائض في تركيز حاملات الشحنة الأغلبية هو الذى يهين القوة المحركة لعملية الانتشار ومن ثم سيرتبط بمعادلات الانتشار خلال السطور القليلة التالية.

يمثل شكل (٥-٢٠) عملية حقن حاملات شحنة الأقلية عبر منطقة النضوب فى نموذج لثنائى يعمل فى حالة انحياز أمامى. ولو بدأنا باعتبار منطقة التعادل جهة شبه الموصل p، يكون تركيز حاملات شحنة الأغلبية من الشغرات عند الاتزان الحرارى، p_{p0} وتركيز حاملات شحنة الأقلية من الإلكترونات عند الاتزان الحرارى، n_{p0} .

وعند التأثير بالانحياز الأمامى يتم حقن حاملات شحنة الأغلبية من الشغرات عبر منطقة النضوب لتبدو عند حافتها البعيدة على الناحية n كحاملات الشحنة «الأقلية» ويمثل تركيزها عند هذه الحافة بموضع النقطة B فى الشكل، كما يمكن حسابها من المعادلة (5-61).



شكل (٥-٢٠) فائض تركيز حاملات الشحنة الأقلية عند حافتي
طبقة النضوب بالوصلة pn

ينتشر هذا العدد من حاملات الشحنة الأقلية في المنطقة الخالية من المجال عند شبه الموصل n ، مع اضمحلال في التركيز بحذاء الوصلة الأومية آسيا ، حتى ينتهي إلى تركيز الاتزان الحرارى p_{no} ، وتبسيط الشكل والحساب فقد تم اختيار نقطة أصل الجهة n عند الحافة اليمنى من طبقة النضوب.

ولو نظرنا الآن على الجانب n ، يكون تركيز حاملات شحنة الأغلبية من الإلكترونات عند حالة الاتزان الحرارى n_{no} ، وتركيز حاملات شحنة الأقلية من الشغرات p_{no} .

كذلك يتم حقن حاملات الشحنة الأغلبية من الإلكترونات عبر منطقة الوصلة من الجهة n إلى الجهة p لتبدو كحاملات الشحنة الأقلية ، يمثل تركيزها عند الحافة اليسرى لطبقة النضوب بالنقطة A على الجانب p للنبيطة. وأيضاً قد تم هنا اختيار نقطة أصل الجهة p عند الحافة اليسرى لطبقة النضوب. كل ذلك يحدث بتسليماً بمبدأ استمرارية التيار الكهربى ، حيث يفترض أنه لا توجد مصادر ثانوية أو مستودعات لتيارات ما داخل طبقة النضوب.

يتحدد اضمحلال تركيز حاملات الشحنة الأقلية من العلاقات التالية :

على الجانب p من الوصلة :

$$\delta n (l_p) = \delta n (0) \exp \left(- \frac{l_p}{L_n} \right) \quad (5-62)$$

وعلى الجانب n :

$$\delta n (l_n) = \delta p (0) \exp \left(- \frac{l_n}{L_p} \right) \quad (5-63)$$

حيث :

$$\delta n = n_p - n_{po} \quad (5-64)$$

$$\delta n = n_p - n_{po} \quad (5-65)$$

$$\delta n (0) = n_{po} \exp \left\{ \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right\} \quad (5-66)$$

$$\delta p (0) = p_{no} \exp \left\{ \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right\} \quad (5-67)$$

حيث الإراحة عند حافة طبقة النضوب، في المنطقة p ، $I_p = p$ وفي المنطقة n ، $I_n = n$.
 لاستخلاص قيمة كثافة التيار الكهربى الكلى J علينا أولا إيجاد قيمتى كثافتى تيارى الإلكترونات J_n والثقوب J_p ثم جمعهما معا .
 تعطى كثافة تيار الإلكترونات بالعلاقة :

$$J_n = q D_n \frac{dn}{dx} \quad (5-68)$$

حيث يمثل D_n معامل انتشار الإلكترونات ووحداته $(m^2 s^{-1})$ ، ويمثل (dn/dx) تدرج التركيز فى الاتجاه السينى للإحداثيات .

يأجاء التفاضل على المعادلة (5-62)، ثم التعويض فى المعادلة (5-68) نحصل على كثافة فائض حاملات الشحنة «الأقلية» من الإلكترونات على الصورة :

$$J_n (I_p = 0) = - \frac{q D_n n_{po}}{L_n} \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (5-69)$$

تعنى الإشارة السالبة فى هذه المعادلة أن تيار الإلكترونات يكون فى الاتجاه المعاكس لاتجاه زيادة الإراحة I_p ، أى يكون فى الاتجاه الموجب لمحور السينات .

كذلك تتعين كثافة فائض حاملات الشحنة «الأقلية» من الشغرات بالعلاقة :

$$J_p (I_n = 0) = - \frac{q D_p p_{no}}{L_p} \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (5-70)$$

ويكون هذا التيار صوب الاتجاه الموجب للمحور السينى أيضا .

نحصل بذلك على الشدة الكلية لكثافة التيار الناتج عن حركتى الإلكترونات والشغرات ويسرى فى النبطة على الصورة :

$$J = q \left(\frac{D_p p_{no}}{L_p} + \frac{D_n n_{po}}{L_n} \right) \left(\exp \left[\frac{qV}{kT} \right] - 1 \right) \quad (5-71)$$

$$J_o \equiv q \left(\frac{D_p p_{no}}{L_p} + \frac{D_n n_{po}}{L_n} \right) \quad \text{ويعرّف الكمية :}$$

يمكن اختزال المعادلة (5-71) إلى :

$$J = J_n \left(\exp \left[\frac{qV}{kT} \right] - 1 \right) \quad (5-72)$$

إذا تم ضرب طرفي هذه المعادلة في مساحة مقطع الثنائي، تصبح شدة التيار :

$$I = I_n \left(\exp \left[\frac{qV}{kT} \right] - 1 \right) \quad (5-73)$$

حيث التيار العكسي

$$I_n = qA \left(\frac{D_p p_{no}}{L_p} + \frac{D_n n_{po}}{L_n} \right)$$

تمثل هذه النتيجة المعادلة المثلى للثنائي في حالة الانحياز الأمامي، وتصلح أيضا للانحياز العكسي إذا تم عكس إشارة V وأصبحت $qV > kT$ ، فتصبح $\exp(-\infty) = 0$ ، وتقول شدة التيار إلى :

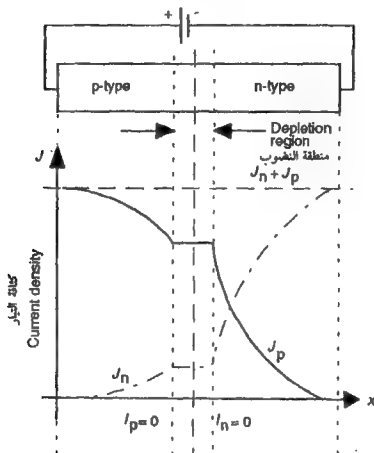
$$I = - I_0 \quad (5-74)$$

وهي قيمة تيار التشبع العكسي، كما يوضحها المنحنى $(I-V)$ المميز للثنائي.

في هذا الاستنتاج افترض أن قيمة كثافة تيار الإلكترونات واحدة عند حافتي طبقة النضوب، وكذلك بالنسبة لكثافة تيار الشفرات، يتضح ذلك في شكل (٥-٢١) بالخطين الأفقيين عبر طبقة النضوب. أحدهما (السفلي) لتيار الإلكترونات والآخر لتيار الشفرات، هذا الفرض يحقق مبدأ استمرارية التيار الكهربى عبر منطقة النضوب دواما يكون هناك توليد إضافي أو التثام للشحنات بداخلها. وهذا يعنى عبور كل الشحنات المحقونة دون فقد. يلاحظ أيضا بالشكل ثبات قيمة الكثافة الكلية لشدة التيار $(J_n + J_p)$ المار عبر الثنائي، هذا على الرغم من اضمحلال كثافة حاملات الشحنة «الأقلية» أسيا بالابتعاد عن حافتي منطقتي النضوب، إلا أن حاملات الشحنة «الأغلبية» تزداد أسيا في هذا المدى فيؤدى جمع هاتين الكثافتين عند أى لحظة إلى ثبات قيمة التيار.

يبين شكل (٥-٢٢) كلا من كثافة حاملات الشحنة وكثافة التيار الكلى خلال الثنائي تحت تأثير الانحياز العكسي. ويظهر بجلاء الاتساع الشديد لطبقة النضوب في هذه الحالة. الانحياز العكسي يعوق انسياب تيارات الانتشار الأمامي ويستخلص كل من تيار الأقلية للشفرات من الجهة « و تيار الأقلية للإلكترونات من الجهة p . ويكون المجال الكهربى قرب منطقة الوصلة شديدا بدرجة كافية لأن يقتلع عبر الوصلة كافة تيارات النادرة التى تولدت حراريا داخل المدى المكافئ لأطوال الانتشار L_n, L_p من حواف طبقة النضوب. هذا السريان لتيارات الأقلية عبر الوصلة يكون تيار التشبع العكسي.

تزداد قيمة تيار التشيع العكسى بزيادة درجات حرارة النيةطة بشكل لا يعتمد على قيمة الانحياز العكسى بفرض عدم وجود مراكز مشحونة داخل الرقعة الواسعة لطبقة النضوب وبشرط أن نكون فى مأمن من انهيار الوصلة ذاتها.



شكل (٢١-٥) كثافة تيار الانحياز الأمامى

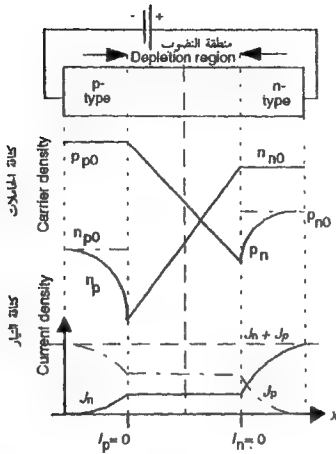
مثال ٣-٥ :

احسب فرق الجهد الأمامى عبر طرفى وصلة pn لثنائى مثالى، عند درجة حرارة الغرفة وشدة تيار أمامى قدره 15 mA إذا كان شدة تيار التشيع العكسى يعطى بالقيم :

8 pA (ب)

5 μ A (١)

وإذا تم قياس هاتين القيمتين للتيار العكسى فى ثنائين لهما نفس الأبعاد الظاهرية. بين أى التيارين يكون لثنائى السيليكون وأيهما لثنائى الجيرمانيوم.



شكل (٢٢-٥) الوصلة pn في حالة انحياز عكسي

الحل :

لحساب فرق الجهد الأمامي نستخدم العلاقة :

$$I = I_o \exp \left\{ \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right\}$$

ومنها :

$$V_F = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{I_o} + 1 \right)$$

باعتبار قيمة شدة التيار العكسي المعطاة في (١) تصبح :

$$V_F = 26 \times 10^{-3} \ln \left(\frac{15 \times 10^{-3}}{8 \times 10^{-6}} + 1 \right) = 0.2 \text{ V}$$

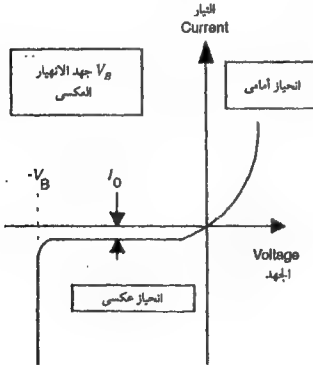
وباعتبار القيمة عند (ب) تصبح :

$$V_F = 26 \times 10^{-3} \ln \left(\frac{15 \times 10^{-3}}{8 \times 10^{-12}} + 1 \right) = 0.53 \text{ V}$$

للإجابة عن الجزء الثانى، نعلم أن تيار التسرب العكسى ينشأ عند كسح مجال الوصلة pn إلى داخلها حاملات الشحنة الأقلية المولدة حرارياً قرب حواف منطقة النضوب. كلما صغرت فجوة الطاقة فى شبه الموصل زادت شحنات الأقلية المولدة حرارياً، وعليه فالتيار العكسى ذو القيمة الأكبر يكون من نصيب ثنائى الجيرمانيوم لتمييزه بفجوة طاقة قدرها 0.7 eV بينما تكون فجوة الطاقة فى السيليكون 1.1 eV .

(٩-٥) الانهيار العكسى Reverse Breakdown

يبين شكل (٥-٢٣) ما يحدث للمنحنى $I-V$ المميز للوصلة pn فى ثنائى شبه الموصل عند التأثير بجهد انحياز عكسى كبير. إذا لم تكن هناك على التوالى مع النبيطة مقاومة كهربية مناسبة تُحد من شدة التيار، فسُقد نصل إلى قيمة من جهد الانحياز العكسى، تعرف بجهد الإذعان (الاستسلام) تنهار عندها الوصلة pn ويدمر الثنائى. وتصنع بعض الثنائيات خصيصاً بحيث يكون لها جهد إذعان نوعى لتستخدم كثنائيات مرجعية للجهد فى دوائر التحكم.



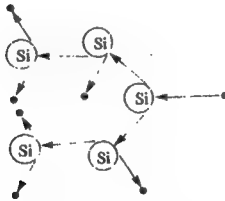
شكل (٥-٢٣) الانهيار العكسى
وجهد الإذعان على منحنى $I-V$
المميز للثنائى

تعتمد آلية الانهيار على نوع الشائى ففي الوصلة pn ذات الإشابة العالية تعرف هذه الآلية بانهييار رينر، تحدث عند انحياز عكسى قدره 5V أو أقل وإذا انخفض مستوى الإشابة تعرف آلية الانهيار بالانهيار الإلكتروني، وتستخدم كثنائيات مرجعية للجهد العالى.

نوجز فيما يلى وصفا لآليات الانهيار المشار إليهما :

(أ) الانهيار الإلكتروني Electron Avalanche

يحدث بسبب الزيادة المطردة فى شدة المجال، الناجمة عن الانحياز العكسى. وفيها يكتسب الإلكترون طاقة كافية يصطدم بها مع ذرة ما فى الشبكة ويؤينها، يندفع إثر ذلك إلكترون التكافؤ المنفصل من شريط التكافؤ إلى شريط التوصيل بينما يتزوج الإلكترون المصطدم مع الشفرة الموجبة مكونا وحدة متماسكة تعرف بزوج الإلكترون والشفرة، يتسارع بدوره ليستصدم مع الذرات ويخلّف العديد من إلكترونات وأزواج. تعرف هذه الآلية أيضا بالتأين التصادمى، شكل (٥-٢٤).



شكل (٥-٢٤) الانهيار الإلكتروني بالتصادم الأيونى

(ب) انهيار زينر Zener Breakdown

على النقيض من الانهيار الإلكتروني يحتاج هذا الانهيار إلى مستوى إشابة عال فى الوصلة pn . بذلك تصبح طبقة النضوب صغيرة جدا. يتولد فيها مجال كهربى شديد للغاية حتى دون انحياز مؤثر؛ لهذا السبب تكون فى حاجة إلى انحياز عكسى صغير كى نرفع المجال إلى الحد الكافى لنزع الإلكترونات من نطاق التكافؤ، ويحدث هذا الانهيار عند جهود منخفضة تقل عن 5V.

مثال ٥-٤ :

ارسم شكلا تخطيطيا لتغير شدة المجال الكهربى فى وصلة pn عند حالة الاتزان الحرارى ، إذا كانت درجة الإشابة الذرية $10^{15} / \text{cm}^3$ فى كل من ناحيتى الوصلة .

بين أيضا بالرسم كيف يتغير هذا المجال مع زيادة الانحياز العكسى . ثم احسب النهاية العظمى لشدة المجال عند الوصلة إذا كان الثنائى من السيليكون وطبق عليه انحياز عكسى قدره 150 V . إهمال الجهد الداخلى .

ما هو جهد الإذعان لهذا الثنائى إذا جاء انهيار الوصلة عند مجال كهربى شدته 10^5 V/cm ؟

الحل :

يمثل شكل (٥-٢٥) كيفية تغير شدة المجال عند الوصلة مع زيادة الانحياز العكسى . مع زيادة الانحياز العكسى تزداد رقعة النضوب وتجرى شحنات أكثر فيزداد المجال تبعا لمعادلة بواسون وتحدد قيمة النهاية العظمى \mathcal{E}_m لشدة المجال من العلاقة :

$$\mathcal{E}_m = - \frac{q N_D x_n}{\mathcal{E}_{si}} = - \frac{q N_D x_p}{\mathcal{E}_{si}}$$

وحيث إن مستوى الإشابة متساو على ناحيتى الوصلة . يكون الاتساع x_n مساويا للاتساع x_p . وبما أن الجهد يعطى بالعلاقة :

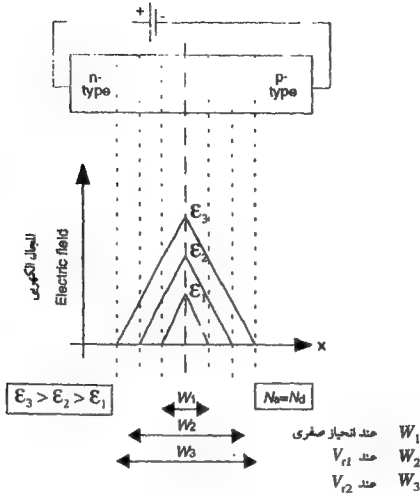
$$V = - \int \mathcal{E}_x dx$$

فإنه يمكن تعيينه من حساب مساحة المثلث وفقا للعلاقة :

$$V = \frac{1}{2} (|x_n| + |x_p|) \mathcal{E}_m = |x_n| \mathcal{E}_m = |x_p| \mathcal{E}_m$$

بالتعويض عن $V = 150 \text{ V}$ وإهمال الجهد الداخلى .

$$\therefore 150 = \left(\mathcal{E}_m \frac{\mathcal{E}_{si}}{q N_D} \right) \mathcal{E}_m$$



شكل (٢٥-٥) تخطيط المجال في الخال

ومنها :

$$\epsilon_m = \sqrt{\frac{(150)(1.6 \times 10^{-19})(10^{15})}{(8.854 \times 10^{-14})(11.9)}} = 1.5 \times 10^5 \text{ V/cm.}$$

وإذا كان المجال المناظر للانحياز 10^5 v / cm

فإنه يمكن حساب جهد الإذعان من النسبة التالية :

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right)^2 \quad \therefore \quad \frac{V_1}{150} = \left(\frac{10^5}{1.5 \times 10^5} \right)^2$$

ومنها يصبح جهد الإذعان المطلوب V_1 :

$$V_1 = 66.7 \text{ V.}$$

(١٠-٥) سعة النضوب Depletion Capacitance

نعرف عن المكثف الكهربي أنه أداة لاختزان الشحنة الكهربائية وفقا للعلاقة :

$$Q = C V \quad (5-75)$$

حيث تمثل Q الشحنة المختزنة بالكولوم، C سعة المكثف بالفاراد، V فرق الجهد بالفولت عبر طرفي المكثف.

عند تطبيق انحياز عكسي للوصلة pn يظهر قدر كبير من الشحنات في منطقة النضوب بالمقارنة بحالة الاتزان الحراري، وعلى التقيض عند التأثير بانحياز أمامي عبر الوصلة، تنحصر منطقة النضوب وتقل معها الشحنات الظاهرة، بذلك تصبح هذه النبيلة شبيهة بمكثف كهربي متغير السعة تبعا للانحياز المؤثر عليها. استغلت هذه الخاصية للوصلة pn في تصنيع نبائط خاصة تعمل كمكثفات كهربية متغيرة السعة، تعرف بالثنائي متغير السعة «فاراكترور». وتستخدم غالبا في دوائر التوليف الكهربية.

تتغير سعة طبقة النضوب للوصلة pn لوحدة المساحات في الثنائي بالعلاقة :

$$C_{dep} = \frac{\epsilon_{si}}{W} \text{ F/cm}^2 \quad (5-76)$$

حيث W عرض طبقة النضوب، وهذه العلاقة تناظر علاقة سعة المكثف متوازي اللوحين.

نستعرض فيما يلي خواص السعة المتغيرة للوصلة pn أحادية الجانب، (المنورة) لما لها من تطبيقات شائعة. باستخدام العلاقة (5-41) يمكن كتابة عرض طبقة النضوب لهذا الثنائي عندما يؤثر عليه بانحياز عكسي على الصورة :

$$W = \left(\frac{2 \epsilon_{si} [V_{bi} + V_R]}{q N_D} \right) \quad (5-77)$$

بتعويض ذلك في العلاقة (5-76) يمكننا حساب السعة لوحدة المساحات في الثنائي .

$$C_{dep} = \left(\frac{q \epsilon_{si} N_D}{2 [V_{bi} + V_R]} \right)^{1/2} \quad (5-78)$$

هذه العلاقة يمكن صياغتها على صورة :

$$\boxed{\frac{1}{C^2} = \left(\frac{2 [V_{bi} + V_R]}{q \epsilon_{si} N_D} \right)} \quad (5-79)$$

خلال هذا الاستنتاج اخترنا الجهة n من الوصلة لتكون جهة مستوى الإشابة الأقل . بالطبع يمكننا اختيار الجهة p إذا شئنا .

تخبرنا المعادلة (5-79) بأنه إذا استخدما مثل هذا الثنائي في دائرة كهربية غير فيها شدة الانحياز العكسي V_R ونحسب عند كل تغيير السعة الكهربية المناظرة للوصلة C ، ثم نرسم العلاقة البيانية بين V_R ، $1/C^2$ نحصل على خط مستقيم يميل بزاوية موجبة على المحور السيني . شكل (٢٦-٥)، وعمدنا ميل الخط بمستوى الإشابة N_D ، كما يمدنا طول الجزء المقطوع من محور V_R بقيمة حاجز الجهد V_{bi} . وهذه عناصر مهمة للغاية في مجال أشباه الموصلات .

مثال ٥-٥ :

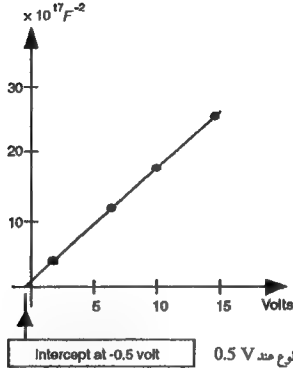
أوجد الجهد الداخلي وتركيز الإشابة في جانب الإشابة المنخفض للوصلة $p^{++}n$ ، وذلك بدراسة العلاقة بين الانحياز العكسي والسعة في ثنائي مساحة مقطعه $4 \times 10^{-5} \text{m}^2$.

الحل :

يمثل شكل (٢٦-٥) الخط البياني الناتج من قياسات هذه التجربة ومنه عند $1/C^2=0$ تكون $V_{bi} = -V_R$ ، وبذلك تصبح $V_{bi} = 0.5 \text{V}$. في المعادلة (5-78) تعبر C_{dep} عن السعة لوحدة المساحات . إذا كانت سعة الوصلة C_T فإن $C_T/A = C_{dep}$ ، حيث A مساحة مقطع الوصلة .

$$\therefore \frac{1}{C_T^2} = \frac{2 (V_{bi} + V_R)}{q \epsilon_{si} N_D A^2} = \frac{2 V_{bi}}{q \epsilon_{si} N_D A^2} + \frac{2}{q \epsilon_{si} N_D A^2} V_R$$

Graph of $1/C^2$ against v
for a p^+n diode



شكل (٢٦-٥) العلاقة بين $1/C^2$ ، V_R في ثنائي الوصلة p^+n

من حساب الميل $\frac{2}{q \epsilon_{si} N_D A^2}$ والتعويض عن الثوابت، نصل إلى :

$$N_d = 4.35 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} = 4.35 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

مثال ٥-٦ :

احسب سعة طبقة النضوب لوصلة p^+n من السيليكون بمساحة مقطع $1.14 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ إذا أثر عليها انحياز عكسي قدره 10 V، إذا كانت درجة الإشابة 10^{16} cm^{-3} على الجانب n ، 10^{20} cm^{-3} على الجانب p^+ علماً بأن كثافة تركيز الشحنة الذاتية n_i هي: $1.4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

الحل :

في العلاقة .

$$C_{dep} = \frac{q \epsilon_{si} N_D}{2 [V_{bi} + V_R]}$$

يمكن حساب :

$$\begin{aligned} V_{bi} &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \\ &= (0.0259) \ln \frac{10^{16} \times 10^{20}}{(1.4 \times 10^{10})^2} = 1.1 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\therefore C_{dep} = \left[\frac{1.6 \times 10^{-19} \times 11.9 \times 8.854 \times 10^{-14} \times 10^{16}}{2 (1.1 + 10)} \right]^{1/2} = 8.7 \times 10^{-9} \text{ F/cm}^2$$

وتكون سعة الوصلة C_i :

$$C_i = C_{dep} \times A = 8.7 \times 10^{-9} \times 1.14 \times 10^{-3} = 10 \text{ pF}$$

(١١-٥) ملخص الفصل :

الكهربية الساكنة للوصلة pn والتي غطيناها في هذا الفصل توفر أساسا لنمذجة عمل ثنائي بوصلة pn والنبائط الأخرى التي تم وصلات pn .

في البداية قمنا بتعريف مصطلحات مثل الشكل الجانبي والوصلة الميتالورجية والتي شهدت النطاقات عبر الوصلة الثنائية . بعد ذلك حللنا التيار الكلي المكون من مركبتى الانسياب والانتشار مما مكنا من حساب ارتفاع حاجز الجهد في حالة عدم وجود تيار ثم قدمنا مع اشكال توضيحية تقريب النضوب والذي يعتبر أهم وأكثر النماذج المقربة شيوعا .

باستخدام هذا النموذج تم الحصول على حلول تفصيلية لكثافة الشحنة، للمجال الكهربى، والجهد الكهروستاتيكي داخل الوصلة تحت ظروف الاتزان . وامتد التحليل ليشمل حالات الانحياز المختلفة، وتم فيها فحص تأثير جهد الانحياز الخارجى على المتغيرات المختلفة وأدى ذلك إلى رسم منحنيات نطلق في حالتى الانحياز الامامى والعكسى .

وقد وجد أن تيار الانحياز العكسي في الثنائي المثالي يرتبط بالحاملات الأقلية التي تتجول في منطقة النضوب عندما تتسارع من الناحية الأخرى من الوصلة، أما الانحياز الأمامي فيقلل حاجز الجهد بين جانبي الوصلة ويقوى حقن حاملات الأغلبية عبر الوصلة ولا يوجد بالطبع تراكم للشحنات داخل النيةطة في حالة الاستقرار. كما تم بيان تأثير عمليات التوليد وإعادة الالتئام على استقرار تركيزات حاملات الأقلية.

وأعير الاهتمام بوجه خاص إلى صياغة واشتقاق وفحص نظرية الثنائي المثالي، وبالرغم من أنها لا تمثل الواقع بدقة إلا أنها تنير العمليات الداخلية في الثنائي.

كما تم فحص بعض الظواهر الواقعية مثل الانهيار العكسي والانهمار ومعة النضوب.

أسئلة الفصل :

- ١- ثنائي pn من $GaAs$ مبتور ، فيه $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ، $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.
 (أ) احسب موضع طاقة فرمي عند 300 K في كل من المنطقة p والمنطقة n .
 (ب) ارسم مخطط نطاق الطاقة عند الاتزان وعين قيمة الجهد المبني .
 - ٢- في المسألة السابقة ، إذا كان قطر الثنائي $50 \mu\text{m}$. احسب اتساع طبقة النضوب في المنطقة n والمنطقة p ، وكذلك احسب مقدار الشحنة في طبقة النضوب . ثم ارسم بروفيل (مخطط جانبي) المجال الكهربى في الثنائي .
 - ٣- إذا تغير جهد الانحياز على الثنائي في المسألة (١) على النحو :
 $V_F = 0, 1, 0.5, 1, 5 \text{ V}$ احسب اتساع طبقة النضوب وأقصى قيمة لشدة المجال عند هذه الانحيازات .
 - ٤- ثنائي pn مبتور من السيليكون فيه $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ، $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ عند 300 K . احسب الجهد المبني واتساع النضوب وأقصى قيمة لشدة المجال عند هذه الانحيازات .
 - ٥- ثنائي pn من الجيرمانيوم فيه $N_A = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ، $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. احسب قيمة الجهد المبني عند 300 K . واحسب درجة الحرارة التي عندها يقل الجهد المبني بمقدار 1% .
 - ٦- ثنائي p^+n سيليكون فيه $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ، $N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ، معامل انتشار الشغرات ناحية n يساوى $10^2 \text{ cm}^2/\text{s}$ ، $\tau_p = 10^{-7} \text{ s}$ ومساحة النيطة 10^{-4} cm^2 . احسب تيار التشيع العكسى والتيار الأمامى عند انحياز أمامى قدره 0.4 V وعند 300 K .
 - ٧- عرف المصطلحات التالية :
- الوصلة الميتالورجية (الفلزية) - الوصلة pn - طبقة النضوب - الانهيار الإلكتروني - الانهمار .



الفصل السادس

الترانزستور ثنائي القطب

BIPOLAR TRANSISTOR



مقدمة

- (١-٦) توصيل النبيلة
 - (٢-٦) مفاهيم أولية
 - (٣-٦) أساسيات الترانزستور
 - (٤-٦) سعة (مواصلة) الانتشار
 - (٥-٦) مركبات التيار
 - (٦-٦) وسائط (بارامترات) الترانزستور
 - (٧-٦) معامل كفاءة الباعث
 - (٨-٦) عامل النقل القاعدي
 - (٩-٦) النبيلة BJT في الترددات العالية
 - (١٠-٦) الاختراق الكلي
 - (١١-٦) أنماط (صيغ) التشغيل
 - (١٢-٦) تحسين كسب التيار
 - (١٣-٦) الإلكترونيات الدقيقة (المفرغة)
 - (١٤-٦) ملخص الفصل
- أسئلة الفصل



مقدمة:

يعتبر الترانزيستور ثنائي القطب (نبیطة ذات ثلاثة أطراف تخرج من ثلاث طبقات متتابعة لأشباه موصلات n, p . قد يكون التابع على النحو (npn) أو (pnp) . یبین شكل (٦ - ١، ١، ب) هاتین النیطتين مع الرمز المميز لكل منهما. وفي مجال التعامل الدائم مع هذه النیطات يعتبر الترانزیستور (npn) الأكثر شیوعا؛ ولذا سوف نتناوله بشيء من التفصیل.

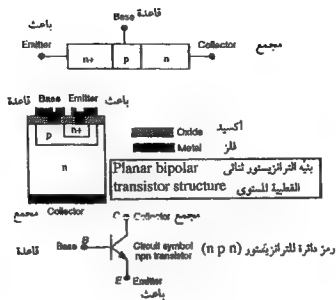
(١-٦) توصیل النیطة Device Connection

نتیجة للأطراف الثلاثة للترانزیستور، الباعث E والقاعدة B والمجمع C ، نجد أن هناك ثلاث طرق یمكن التعامل بها مع النیطة، ویبین شكل (٦ - ٢) هذه الطرق المختلفة وفي أی منها یكون أحد الأطراف مشتركا بین مدخل ومخرج النیطة وبذلك یُميز اسم منظومة الاتصال عند التشفیل المعتاد أو النشط للترانزیستور، فنجد نسق الباعث المشترك ونسق المجمع المشترك وكذلك نسق القاعدة المشتركة. ویبین شكل (٦ - ٣) رسما تخطيطیاً لترانزیستور (npn) وفيه تكون الوصلة بین جزءى الباعث والقاعدة فی اتجاه تيار كهربي أمامی يعرف باتجاه الانحیاز الأمامی، بينما تكون الوصلة بین جزءى المجمع والقاعدة فی اتجاه تيار عكسی يعرف باتجاه الانحیاز العكسی.

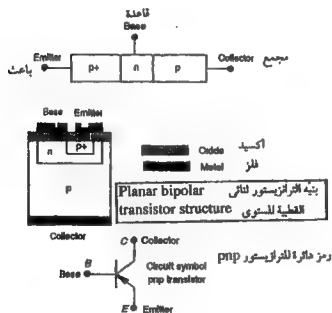
(٢-٦) مفاهيم أولیة

یلعب سمك منطقة القاعدة فی الترانزیستور ثنائي القطب دورا هاما فی النیطة. فإذا كان هذا السمك رفیعا بقدر كاف، فإن الإلكترونات المحقونة داخل القاعدة p بواسطة الانحیاز الأمامی لوصلة الباعث - قاعدة تتاح لها فرصة الانتشار عبر القاعدة كى تصل إلى وصلة المجمع - قاعدة ويتبع ذلك ظهور منطقة تعادل داخل القاعدة كلما ابتعدنا عن منطقة الوصلتين نحو المركز، وإذا كان تركیز حقن الشوائب منتظما، فإن هذه المنطقة سوف تخلو من أی مجال كهربي وتصیح حركة ناقل الشحنة مدفوعة بقوة الانتشار.

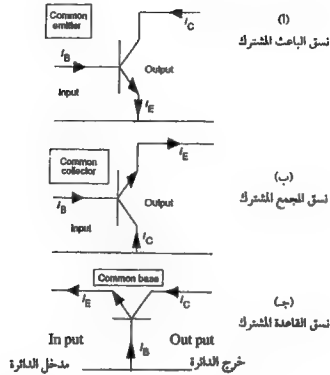
كلما ترققت طبقة القاعدة كان تصل إلى $(10 / 1)$ من طول الانتشار المميز للإلكترون فإن معظم الإلكترونات سوف تجبر على أن تعبر هذه الطبقة قبل أن تلتئم مع



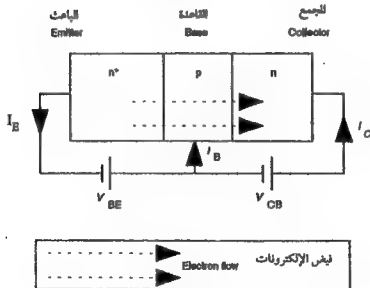
شكل (٦ - ١) رسم تخطيطي لترانزستور (n p n)



شكل (٦ - ١ ب) رسم تخطيطي لترانزستور (p n p)



شكل (٦ - ٧) طرق التوصيل المختلفة للتشغيل
النشط في الترانزستور ($n p n$)



شكل (٦ - ٧) حركات الشحنات في ترانزستور
عند التشغيل النشط ($n p n$)

شحنات الاغلبية الموجبة (الشغرات) فى القاعدة ذاتها وهذه الإلكترونات التى تعبّر القاعدة وتصل إلى منطقة ضبوب وصلة للمجمع - قاعدة ذات الانحياز العكسى، نجد نفسها تحت مجال كهيرى يقوم بتعجيلها نحو المجمع. تمثل الإلكترونات التى تظهر قرب حافة منطقة النضوب فى القاعدة «الحاملات الأقلية» وينتج عنها تيار التسرب العكسى فى الوصلة ($p-n$). عندئذ إذا تعمدنا إقحام كميات من شحنة الحاملات الأقلية بجوار منطقة نضوب وصلة الانحياز العكسى، فسوف نلاحظ زيادة هائلة فى قيمة التيار العكسى.

من ناحية أخرى تكون وصلة الباعث - قاعدة ذات انحياز أمامى ويتم عبرها حقن إلكترونات من الباعث نحو القاعدة كى تتجمع فى المجمع، وفى المقابل تحقن الشغرات من القاعدة نحو الباعث مكونة بذلك تيارا أماميا من الشغرات خلال وصلة الباعث - قاعدة ويعرف بتيار القاعدة.

ونعلم أنه فى ثنائى شبه الموصل تقوم الجهة المشابة بدرجة أعلى فى الوصلة بحقن غالبية حاملات الشحنة. فلو كان لدينا ثنائى p^+n فإن معظم تيار الثنائى عند الانحياز الأمامى سيكون من الشغرات، وكذلك إذا كان لدينا الثنائى p^+n سيكون معظم التيار من الإلكترونات.

لنفترض أن الترانزستور (npn) له وصلة باعث - قاعدة p^+n ، فيكون معظم التيار المنساب خلال هذه الوصلة تحت تأثير الانحياز الأمامى من الإلكترونات (تيار إلكترونى). ينساب أيضا قدر ضئيل جدا من تيار الشغرات، لو تم منعه بقطع الاتصال بالقاعدة فى شكل (٦ - ٣) لمنع أيضا تيار الثنائى المؤلف من الباعث والقاعدة (وصلة الباعث - قاعدة) وينهار الانحياز الأمامى، وتبعاً لذلك يتوقف انسياب التيار الإلكترونى.

فإذا أعيد الاتصال بالقاعدة عاد كل شيء إلى ما كان عليه وانهمر سيل جارف من التيار الإلكترونى بين الباعث والمجمع. وبذلك يمكن التحكم فى هذا التيار من خلال تيار القاعدة الضئيل. فإذا أمكن «هزهزة» تيار القاعدة أمكن «هزهزة» الفيضان المنساب من تيار إلكترونى بين الباعث والمجمع. بذلك قد نحصل على مكبر أو متذبذب أو مفتاح قطع - وصل (Switch) باستخدام هذه النيةطة.

مثال (٦ - ١):

ترانزستور ($n p n$)، فيه مساحة كل من وصلتي الباعث - قاعدة والمجمع - قاعدة 0.1 mm^2 ، وفائض من كثافة إلكترونية قدرها $8.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ عند وصلة الباعث - قاعدة. إذا كان اتساع القاعدة $5 \times 10^{-6} \text{ m}$ وقيمة حركية الإلكترون $1500 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$ ، ارسم التوزيع التقريبي للإلكترونات داخل القاعدة واستنبط قيمة تيار للمجمع.

الحل:

يبين شكل (٦ - ٤) في الجزء العلوى ترانزستور ($n p n$) بأجزائه الثلاثة المعروفة، الباعث والقاعدة والمجمع. وفيه فائض من كثافة الشحنة الإلكترونية عند وصلة الباعث - قاعدة ويوضحها المحور الرأسى في الشكل البياني، بينما يمثل اتساع (طول) القاعدة على المحور الأفقى.

نفرض أن للمجمع يستوعب كل الإلكترونات التى تصله دون أن يتبقى شيء داخل القاعدة فإن كثافة الشحنة الإلكترونية تتعادم عند نهاية طول القاعدة (وصلة المجمع - قاعدة) وذلك خلال مسار خطى (متقطع) أو مسار منحنى (متصل). ويعنى منحنى التناقص الأسى أن اتساع القاعدة يزيد كثيراً عن طول الانتشار للإلكترون. أما المسار الخطى فيعنى أن اتساع القاعدة يقل عن طول الانتشار. وعادة يكون اتساع القاعدة ضيقاً (لإحداث التسارع) وعليه نقبل بمسار التناقص الخطى لكثافة الشحنة الإلكترونية مع المسافة لحساب شدة التيار الإلكتروني، يكون التيار الناشئ تيار انتشار لانعدام المجال الكهربى فى القاعدة المتعادلة ذات الشائبة المتظمة التوزيع. ومن خلال معادلات الانتشار، وعلاقة نيوتن فإن معامل الانتشار:

$$D_n = \mu_n \frac{k T}{q}$$

$$= (0.15) (26) (10^{-3}) = (3.9) (10^{-3}) \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

ونحسب كثافة تيار الانتشار J من:

$$J = q D_n \frac{d \delta n}{dx}$$

وبالاستعانة بالرسم البياني نجد أن ميل الخط:

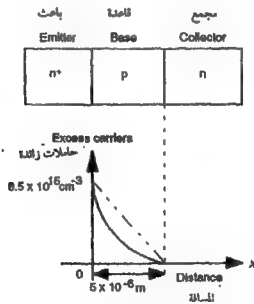
$$\frac{d \delta n}{dx} = \frac{8.5 \times 10^{21}}{5 \times 10^{-6}} = 1.7 \times 10^{27} \text{ m}^{-4}$$

ومنها:

$$J_n = (1.6 \times 10^{-14}) (3.9 \times 10^{-3}) (1.7 \times 10^{27}) = 1.06 \times 10^6 \text{ Am}^{-2}$$

∴ مساحة النشطة = 0.1 mm^2 ، يصبح التيار الإلكتروني عندئذ:

$$I_n = (0.1 \times 10^{-6}) (1.06 \times 10^6) = 0.102 \text{ A}$$



شكل (٦ - ٤) توزيع كثافة الشحنات الإلكترونية داخل القاعدة، مثال (٦ - ١)

مثال (٦ - ٢):

يمكن تعريف معامل الكسب β في ترانزستور ثنائي القطب في دائرة باحث مشترك بالعلاقة:

$$\beta = \frac{I_c}{I_b} = \frac{\text{تيار المجمع}}{\text{تيار القاعدة}} \quad 6-1$$

إذا لم يكن هناك التثام في القاعدة، ينتج أن تيار للمجمع يساوى تيار الباعث. من ناحية أخرى يتناسب تيار الباعث مع درجة إشابة الباعث كما أن تيار القاعدة يتناسب مع درجة إشابة القاعدة. لذلك يمكن أن تتول العلاقة السابقة بصورة تقريبية إلى:

$$\beta = \frac{\text{تيار المجمع}}{\text{تيار القاعدة}} = \frac{\text{إشابة الباعث}}{\text{إشابة القاعدة}} \quad 6-2$$

للتعرف على قيمة المقلار β في ترانزستور ($n p n$) احسب معامل الكسب من المعطيات التالية:

$N_D = 10^{20}$	cm^{-3}	إشابة الباعث
$N_A = 5 \times 10^{16}$	cm^{-3}	إشابة القاعدة
$W_B = 0.8$	μm	اتساع القاعدة
$D_n = 3.75 \times 10^{-3}$	$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$	معامل انتشار الإلكترون
$D_p = 1.15 \times 10^{-3}$	$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$	معامل انتشار الشاخرة

طول الانتشار للشغرة (عند إشابة قدرها 10^{20} cm^{-3} من السيليكون) $0.35 \mu\text{m}$
مع فرض أن اتساع الباعث يزيد كثيرا عن طول الانتشار للحاملات الأقلية يمكن حساب كثافة تيار الانتشار لكل من الإلكترونات أو الشغرات من علاقة سابقة (69 - 5)

$$J_n = \frac{q D_n n_{p0}}{L_n} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

مع الأخذ في الاعتبار أنه بالنسبة للإلكترون يستبدل طول الانتشار للإلكترون L_n باتساع القاعدة W_B في الترانزستور.

∴ تيار الإلكترونات (تيار المجمع):

$$J_n = \frac{q D_n n_{po}}{W_B} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad 6-3$$

وكثافة تيار الشفرات (تيار القاعدة) بتطبيق معادلة سابقة (70 - 5) هي:

$$J_p = \frac{q D_p p_{no}}{L_p} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

بقسمة هاتين المعادلتين نحصل على:

$$\beta = \frac{D_n n_{po} L_p}{D_p p_{no} W_B} \quad 6-4$$

ولكن نعلم أنه من المعادلات (50 , 49 - 5) تكون:

على الجهة n من شبه الموصل (باعث الترانزستور) $n_i^2 = n_{no} p_{no}$

وعلى الجهة p من شبه الموصل (قاعدة الترانزستور) $n_i^2 = p_{po} n_{po}$

$$\therefore \frac{n_{po}}{p_{po}} = \frac{n_{no}}{p_{po}} = \frac{N_D}{N_A}$$

حيث تمثل n_{no} إشابة الباعث N_D ، ويمثل p_{po} إشابة القاعدة N_A .

$$\therefore \beta = \frac{D_n N_D L_p}{D_p N_A W_B}$$

وبالتعويض من المعطيات نجد:

$$\beta = \frac{(37.5) (10^{20}) (0.35 \times 10^{-4})}{(11.5) (5 \times 10^{16}) (0.8 \times 10^{-4})} = 2853$$

يلاحظ أنه بتطبيق العلاقة التقريبية باستخدام تراكيز الإشابة يكون:

$$\beta = \frac{N_D}{N_A} = \frac{10^{20}}{5 \times 10^{16}} = 2000$$

وهو ما يعتبر تقريبا مقبولا للعلاقة.

(٣.٦) أساسيات الترانزستور Transistor Basics

يلعب اتساع القاعدة في الترانزستور ثنائي القطب دورا هاما في كفاءة الترانزستور. فإذا زاد هذا الاتساع إلى عشرة أمثال طول الانتشار شكل (٦ - ١٥)، فإن أى إلكترون يحقق من الباعث إلى داخل القاعدة يلتصم بالشغرات الغالية في القاعدة قبل أن يصل إلى المجمع، ويكون التيار الوحيد المار في دائرة المجمع والقاعدة هو تيار التشبع العكسي أو تيار التسرب I_{CBO} . وعدم مرور تيار في دائرة الباعث والقاعدة حيث تصبح دائرة مفتوحة O.

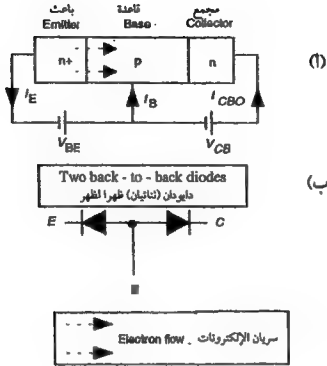
في هذه الحالة تصبح هناك وصلتان منفصلتان بشكل تام، وتعملان كثنائين متعاكسين، كلاهما ظهير الآخر كما يوضحه الشكل (٦ - ٥) وهكذا نرى أنه إذا زاد اتساع القاعدة في الترانزستور عن حد معين انعدم فعل النبيلة. ويتطلب الترانزستور الجليد الاحتياجات التالية:

١ - أن يحدث فيه قدر ضئيل من الالتئام بين حاملات الشحنة لذلك يجب أن تكون القاعدة رقيقة.

٢ - أن يقوم الباعث بحقن قدر وافر من حاملات الشحنة إلى القاعدة؛ ولذلك يحقن الباعث بدرجة إشابة عالية.

٣ - ضرورة اختزال السعة الكهربية بين المجمع والقاعدة كي لا يعطى عمل الترانزستور عند بدء تشغيله ويتطلب ذلك حقن المجمع بدرجة إشابة خفيفة.

٤ - زيادة قيمة معامل الكسب β بدفع تيار صغير من حاملات الاغلبية في القاعدة إلى الباعث، ويعنى ذلك في الترانزستور (npn) ، اختزال تيار الشغرات نحو الباعث إلى أدنى قيمة ممكنة. ويتحقق ذلك عندما تكون إشابة القاعدة أقل منها في الباعث بمدة مرات إلا أن هناك حدودا لهذا الاختزال لأنه سيؤدى إلى زيادة مقاومة القاعدة وهذا بدوره سوف يعطى من عمل الترانزستور.



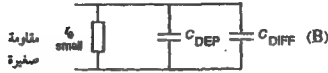
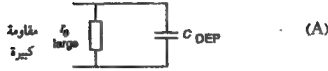
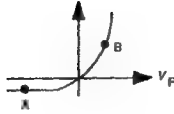
شكل (٦ - ٥) نبيلة ذات قاعدة عريضة

(٦ - ٤) سعة (مواصلة) الانتشار Diffusion Capacitance

إضافة للسعة الكهربية في منطقة نضوب وصلة شبه الموصل، هناك سعة كهربية أخرى تفوقها في المقدار وتعرف بسعة (مواصلة) الانتشار وتصابح عملية حقن الحاملات الاقلية.

إذا تصورنا وصلة الباعث قاعدة، في حالة الانحياز الامامى، حيث يتم دفع أعداد غفيرة من الإلكترونات (حاملات أقلية) إلى داخل القاعدة ذات النوع p . ينشأ مخزون من هذه الحاملات بالقاعدة يكون مسئولاً عن سعة الانتشار. وبذلك تصبح هذه السعة دالة في زمن بقاء الحاملات الاقلية.

يبين شكل (٦ - ٦) المنحنى المميز $I - V$ لوصلة الباعث - قاعدة وهي تشبه المنحنيات المميزة الثنائي الموصل $p-n$ ، وهناك بالشكل دافرتان كهريتان متكافئتان للحالتين A ، B على المنحنى المميز. فالنقطة A موجودة على المنحنى عند حالة الانحياز العكسي وتكون السعة الكهربية هي سعة طبقة النضوب وتتميز بمقاومة كهربية عالية. أما النقطة B فهي عند حالة الانحياز الامامى وعندها تكون السعة مركبة من سعة طبقة النضوب وسعة الانتشار وتتميز بمقاومة كهربية داخلية صغيرة.



شكل (٦-٦) موصلة (سعة) الانتشار

يمكن استنتاج قيمة المقاومة الداخلية للباعث باستخدام علاقة المقوم الثاني التالي والتي جاءت من قبل (73-5) :

$$J = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV_F}{kT} \right) - 1 \right]$$

حيث V_F جهد الانحياز الأمامي للوصلة المعنية. ومن قانون أوم:

$$V = IR$$

وبالتعويض عن I ثم إجراء التفاضل نحصل على:

$$\frac{1}{r_e} = \frac{dI}{dV} = \frac{q}{kT} I_0 \exp \left(\frac{qV_F}{kT} \right)$$

حيث $\frac{1}{r_e}$ هو مقلوب مقاومة الباعث.

وعند جهد انحياز كبير يؤول التيار I إلى $I_F = I_B$ ، يعطى بالعلاقة :

$$I_F = I_0 \exp \left(\frac{qV_F}{kT} \right) \quad 6-7$$

وتصبح :

$$\boxed{\frac{I}{r_e} = \frac{qI_F}{kT}} \quad 6-8$$

وحيث إن $kT/q \approx 26 \text{ mV}$ فإن تيارا كهريا أماميا شدته 1 mA يعطى مقاومة قدرها $r_e \approx 26 \Omega$ للباعث.

ويلاحظ أن قيمة r_e لا تعتمد على أبعاد النيطه وعليه فهي صالحة لاي ترانزيستور.

ولحساب قيمة سعة الانتشار، نجد أنه أثناء بقاء الحاملات الأقلية تكون العلاقة بين الشحنات المختزنة والجهد والسعة هي العلاقة المعروفة . 5 - 75

$$Q = CV$$

وفي الانحياز الامامى لوصلة الباعث - قاعدة، تعتمد الشحنات المختزنة على قيمة الانحياز الامامى ($V_F = V_{BE}$) ، وتتول العلاقة السابقة إلى :

$$C_{diff} = \frac{dQ}{dV_F} \quad 6-9$$

تمثل Q فائض الشحنات المختزنة من الحاملات الأقلية المحقونة فى القاعدة، C_{diff} السعة الكهربية بالانتشار . وهنا لم يؤخذ فى الاعتبار القدر المتناهى فى الصغر من شغرات محقونة فى الباعث لضآلتها ويمكن معالجتها إذا لزم الامر بنفس هذه العلاقات . يلتئم فائض الحاملات الأقلية بمعدل dq/dt يتحدد بزم بقاء هذه الحاملات τ .

$$\therefore \frac{dq}{dt} = \frac{Q}{\tau} = I_F \quad 6-10$$

من المعادلات (6-7)، (6-9)، (6-10) نحصل على:

$$C_{diff} = \frac{\tau q I_F}{kT} \quad 6-11$$

تبين هذه العلاقة بجلاء مدى اعتماد السعة الكهربية الناجمة عن انتشار الشحنات والتي تعرف بسعة الانتشار C_{diff} على كل من التيار الامامى I_F بين الباعث والقاعدة (I_B) وزمن بقاء حاملات الاقلية τ .

مثال (1-3):

احسب قيمتى السعة الكهربية بالانتشار C_{diff} والسعة الكهربية لمنطقة النضوب C_{dep} فى وصلة الباعث - قاعدة لترانزستور ثنائي القطب، مستخدما المعطيات التالية:

- | | |
|------------------------|--------------------------------|
| $I_C = 0.5 \text{ mA}$ | أ - تيار المجمع |
| $\beta = 150$ | ب - معامل الكسب |
| $x_{dep} = 0.1 \mu m$ | ج - اتساع طبقة النضوب |
| $A = 225 \mu m^2$ | د - مساحة الوصلة |
| $\tau = 1 \mu s$ | هـ - زمن بقاء الحاملات الاقلية |

الحل:

يمكن حساب السعة الكهربية لطبقة النضوب من العلاقة:

$$C_{dep} = \frac{A \epsilon_{si}}{x_{dep}}$$

حيث ϵ_{si} ثابت السماحية للسيليكون:

$$C = \frac{(2.25 \times 10^{-10}) (8.854 \times 10^{-12}) (11.7)}{10^{-7}} = 0.233 \text{ pF}$$

وبالنسبة إلى سعة الانتشار نستخدم المعادلة:

$$C_{diff} = \frac{dQ}{dV_F} = \frac{d(I_B \tau)}{dV_{BB}} = \frac{\tau q I_B}{kT}$$

حيث إن التيار المار نتيجة الالتئام بين فائض الإلكترونات المحقونة (من الباعث) والحاملات الأغلبية من الشغرات (فى القاعدة) هو تيار القاعدة I_B وذلك تحت تأثير انحياز أمامى عند وصلة الباعث - قاعدة.

لاستبدال قيمة I_B المجهولة بقيمة تيار المجمع I_C المعروفة نطبق علاقة معامل الكسب β حيث:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

$$\therefore C_{diff} = \frac{\tau q I_C}{k T \beta}$$

$$\therefore C_{diff} = \frac{(1 \times 10^{-6}) (0.5 \times 10^{-3})}{(26 \times 10^{-3}) (150)} = 128 \text{ pF}$$

يوضح هذا المثال مدى كبر سعة الانتشار مقارنة بقيمة سعة النضوب وتكون النسبة بينهما:

$$\frac{C_{diff}}{C_{dep}} = \frac{128}{0.233} \approx 549.3$$

(٥.٦) مركبات التيار Current Components

هناك تيارات عديدة تسرى فى الترانزيستور عند تشغيله وللتعرف عليها، نفترض أن شكل (٦ - ٧) يمثل رسماً لنطاق الطاقة فى الترانزيستور ($n p n$) وهو فى حالة اتزان حرارى، شكل (٦ - ١٧) وفى حالة تشغيل نشط، شكل (٦ - ٧ ب) الذى يلاحظ فيه انخفاض حاجز الجهد عند وصلة الباعث - قاعدة عن مثيلها فى حالة الاتزان الحرارى، بسبب تأثيرها بجهد الانحياز الأمامى. يودى ذلك إلى حقن إلكترونات فى القاعدة وحقن شغرات فى الباعث. إذا كانت القاعدة رقيقة السمك فإن الإلكترونات المحقونة فيها تنتشر عبرها حتى تصل إلى وصلة المجمع - قاعدة التى تكون تحت تأثير جهد انحياز عكسى أدى إلى بثر طاقة فتسقط فيه الإلكترونات (يلاحظ أنه عند دفع حاملات شحنة ما نحو بثر طاقة فإن الإلكترونات تسقط نحو قاع البئر بينما الشغرات تطفو إلى السطح).

وهناك جزء من الإلكترونات المحقونة يعاد التحامها عند القاعدة مولدة بذلك تيار القاعدة I_B ، الذى يعتبر من أهم تيارات التبيطة. كما توجد أيضا تيارات صغيرة ضئيلة مثل تيار التسرب العكسى I_{CB} من الشفرات عند وصلة المجمع - قاعدة. ويمثل شكل (٦ - ٨) هذه التيارات المختلفة التى تناسب فى الترانزيستور، وهى:

I_{EN} التيار الإلكتروني الكلى المنبعث من الباعث.

I_{CN} جزء من التيار الإلكتروني الكلى المنبعث من الباعث ويجمع بالمجمع.

$I_{EN} - I_{CN}$ الجزء المتبقى من التيار الإلكتروني الكلى المنبعث من الباعث وينساب فى القاعدة كتيار التثام.

I_{EP} مركبة الشفرات فى تيار القاعدة ويتبع عن حقن الشفرات من الباعث إلى القاعدة.

I_{CP} مركبة الشفرات فى تيار التسرب الكلى بين المجمع والقاعدة.

وإذا كانت الأسهم داخل الترانزيستور تشير إلى اتجاه الإلكترونات والشفرات فإن اتجاه التيار الكهربى يكون عكس ذلك كما تبينه الأسهم خارج الترانزيستور.

(٦.٦) وسائط (بارامترات) الترانزيستور Transistor Parameters

قد يعمل الترانزيستور فى طور التشغيل النشط، كما جاء فى شكل (٦ - ٣). وفيه تشارك القاعدة كل من دخل الدائرة بين الباعث والقاعدة وخرج من الدائرة بين المجمع والقاعدة، يعرف هذا النسق من التوصيل بنسق القاعدة المشتركة.

لإيجاد روائط الترانزيستور فى هذا النسق، نعرف أن تيار المجمع I_C يتألف من الجزء α_0 من تيار الباعث I_E إضافة إلى تيار التسرب العكسى I_{CBO} ، أى أن:

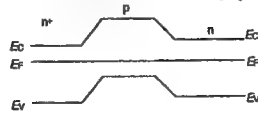
$$I_C = \alpha_0 I_E + I_{CBO} \quad 12-6$$

نعرف α_0 بمعامل الكسب للترانزيستور فى نسق القاعدة المشتركة عند تغيرات طفيفة فى الجهد والتيار. وبتفاضل هذه المعادلة نحصل على:

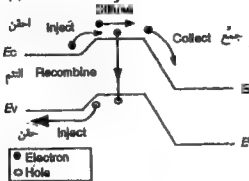
$$\alpha_0 = \left. \frac{\delta I_C}{\delta I_E} \right|_{V_{CB}}$$

13-6

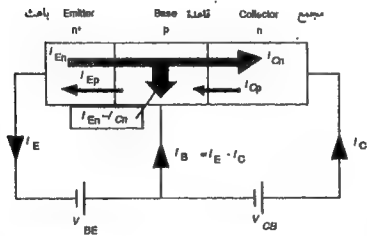
(1) توازن حراري (a) Thermal equilibrium



(ب) طور نشط (b) Active mode



شكل (٦-٧) تخطيطات لطاق الطاقة في الترانزستور



سريان الإلكترونات Electron flow
سريان الشحرات Hole flow

شكل (٦-٨) مركبات التيار الكهربائي في الترانزستور

وحيث إن:

$$I_E = I_C + I_B \quad 6-14$$

وبقاء $I_B > 0$ ، تصبح $I_C < I_E$ ومنها $\alpha_0 < 1$.

يلعب تيار القاعدة دورا هاما في عمل الترانزيستور في هذا النسق وهناك عوامل تسهم في تيار القاعدة منها:

(أ) الشحنات المحقونة من القاعدة إلى الباعث.

(ب) الشحنات الملتزمة (الملتزمة) في القاعدة.

تقودنا دراسة العامل (أ) إلى استنتاج معامل كفاءة الباعث.

بينما يمكننا العامل (ب) من حساب قيمة عامل النقل في القاعدى.

(٧-٦) معامل كفاءة الباعث Emitter Efficiency

يعرف هذا المعامل بأنه النسبة بين التيار الإلكتروني I_{En} المحقون من الباعث إلى التيار الكلى I_E فيه. ويمكن حسابه من العلاقة:

$$I_E = I_{En} + I_{EP} \quad 6-15$$

$$\therefore \gamma = \frac{I_{En}}{I_E} = \frac{I_{En}}{I_{En} + I_{EP}} \quad \text{معامل كفاءة الباعث} \quad 6-16$$

إذا كان الترانزيستور من النوع n^+pn فإن $I_{EP} < I_{En}$ وتصبح:

$$\gamma = 1 - \frac{I_{EP}}{I_E} \quad 6-17$$

وبذلك تكون $\gamma \leq 1$. ويتطبيق علاقات المقوم الثانى عند وصلة الباعث - قاعدة، يمكن حساب قيمة شدة تيار الشفرات I_p المحقون من القاعدة إلى الباعث من العلاقة:

$$I_p = I_{Ep} = \left(\frac{q D_p p_{no} A}{L_p} \right) \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad 6-18$$

حيث A مساحة الوصلة، L_{PE} طول الانتشار للشجرة في الباعث.

كما يعطى تيار الحقن الإلكتروني I_n من الباعث إلى القاعدة بالعلاقة:

$$I_n = I_{En} = \left(\frac{q D_n n_{Po} A}{W_B} \right) \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad 6-19$$

حيث تمثل W_B الانتاع الفعال لسلك القاعدة. من هذه العلاقات يمكن استنتاج قيمة γ في الترانزستور (nnp) على الصورة:

$$\gamma = 1 - \frac{D_p P_{no} W_B}{D_n n_{Po} L_{PE}} \quad 6-20$$

وبدلالة درجات إشابة القاعدة N_A وإشابة الباعث N_D يمكن التعبير عن معامل كفاءة الباعث γ على الصورة:

$$\gamma = 1 - \frac{D_p N_A W_B}{D_n N_D L_{PE}} \quad 6-21$$

تؤكد هذه النتيجة ما سبق التنويه عنه وهو أن تحسين عمل الباعث يتطلب إشابة عالية للباعث وإشابة خفيفة للقاعدة مع تصغير اتساعها إلى حد ما. أى الوصول بالمقدار $(N_A W_B / N_D)$ إلى أدنى قيمة ممكنة له، بذلك تقترب كفاءة الباعث γ من الوحدة.

(٨.٦) عامل نقل القاعدة Base Transport Factor

يعرف هذا المعامل α_T بالنسبة بين التيار الإلكتروني I_{En} الواصل للمجمع إلى التيار الإلكتروني الكلى I_{En} المنبعث من الباعث:

$$\alpha_T = \frac{I_{Cr}}{I_{En}} \quad 6-22 \quad \text{عامل نقل القاعدة}$$

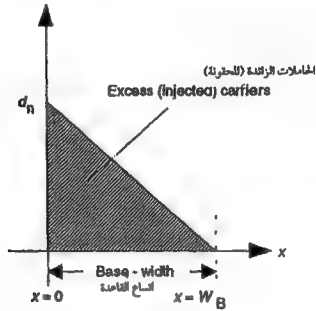
وهو مؤشر لنسبة الفاقد من التيار المحقون داخل القاعدة من جراء عمليات الالتئام (إعادة الالتئام) داخلها. وبالاستعانة بشكل (٦ - ٩) يمكن حساب فائض الشحنات الإلكترونية q_{base} المختزنة في القاعدة الرقيقة السمك وذلك من العلاقة:

$$q_{base} = \frac{q \delta n A W_B}{2} \quad 6-23$$

حيث δn فائض كثافة الشحنة المحقونة عند وصلة الباعث - قاعدة عند $x = 0$.
ولكن بما سبق نجد أن:

$$I_{En} = \gamma I_E \quad 6-24$$

$$I_{Ch} = \alpha_T I_{En} = \alpha_T \gamma I_E \quad 6-25$$



شكل (٦) فائض شحنات القاعدة

ويكون الفرق بين هاتين العلاقتين هو تيار الالتئام $I_B (recomb)$:

$$I_B (recomb) = I_{En} - I_{Ch} = (1 - \alpha_T) \gamma I_E \quad 6-26$$

إضافة إلى ذلك يمكن تعيين كل من تيار الباعث I_E وتيار القاعدة I_B من العلاقات:

$$I_E = \frac{q_{base}}{\tau_{TR}} \quad 6-27$$

$$I_B = \frac{q_{(base)}}{\tau_B} \quad 6-28$$

حيث تمثل τ_{TR} زمن عبور الإلكترونات للقاعدة. τ_B زمن حياة الحاملات الاقلية في القاعدة. بالتعويض عن هذه القيم في المعادلة (6-26) ومع الافتراض أن γ يمكن أن تنزل إلى الوحدة نحصل على عامل نقل في القاعدة:

$$\alpha_T = 1 - \frac{\tau_{TR}}{\tau_B} \quad (\text{عامل نقل القاعدة}) \quad 6-29$$

وللحصول على قيمة هذا المعامل بدلالة سمك القاعدة W_B وطول الانتشار L_{nB} للإلكترون، يمكن الاستعانة بعلاقة تيار انتشار الإلكترونات:

$$I_n = q D_n A \left. \frac{d\delta n}{dx} \right|_{x=0} = I_{En} \quad 6-30$$

بالرجوع إلى شكل (٦ - ٩)، نجد أن ميل الخط:

$$\frac{d\delta n}{dx} = \frac{\delta n}{W_B} \quad 6-31$$

وبفرض جودة الباعث ($\gamma = 1$) يمكن كتابة المعادلة (6-30) في صورة:

$$I_E = \frac{q D_n \delta n A}{W_B} \quad 6-32$$

باستخدام العلاقات (6-23)، (6-27)، (6-32) يمكن التوصل إلى:

$$\tau_{TR} = \frac{W_B^2}{2D_n} \quad 6-33$$

وكذلك يرتبط طول الانتشار L_n بزمان حياة الحاملات τ_B من خلال العلاقة:

$$\tau_B = \frac{L_{nB}^2}{2D_n} \quad 6-34$$

بالتعويض عن هذين الزمنين في العلاقة نحصل على صورة أخرى للمعامل α_T وهى:

$$\alpha_T = 1 - \frac{W_B^2}{2L_{nB}^2} \quad (\text{عامل نقل القاعدة}) \quad 6-35$$

وتدُلنا هذه العلاقة إلى أنه للحد من عمليات إعادة الالتحام والالتصام في منطقة القاعدة يلزم اختزال سمك القاعدة W_B وزيادة طول الانتشار L_{nB} للحاملات الأقلية فيها، تأكيداً لما جاء من قبل.

وكذلك يرتبط كل من زمن حياة الحاملات الأقلية τ_B والزمن العابر للشحنات في تخطيها للقاعدة τ_{TR} بتكبير التيار β في نسق الباعث المشترك للترانزستور بالعلاقة:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\tau_B}{\tau_{TR}} \quad 6-36$$

وذلك بفرض أن إعادة التلاحم والتتام الحاملات الأقلية من إلكترونات في منطقة القاعدة هي الآلية الغالبة فيها.

مثال هام (٦ - ٤):

استنبط العلاقة بين تكبير التيار α_F في نسق القاعدة المشتركة ومعامل التكبير β في نسق الباعث المشترك في الترانزستور.

الحل:

عند التغيرات الصغيرة في شدة التيار، كانت كل من:

$$\beta = I_C / I_B \quad 6-1$$

$$\alpha_0 = I_C / I_E \quad 6-13$$

$$\therefore I_E = I_C + I_B \quad 6-14$$

وبذلك تصبح

$$\therefore \alpha_0 = \frac{I_C}{I_C + I_B} = \frac{1}{1 + (I_B / I_C)} \quad 6-37$$

$$\boxed{\therefore \alpha_0 = \frac{\beta}{\beta + 1}} \quad 6-38$$

و

$$\boxed{\beta = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0}} \quad 6-39$$

مثال (٦ - ٥) :

ترانزستور (npn) ثنائي القطب من السيليكون، فيه إشابة القاعدة 10^{16} cm^{-3} . إذا كان معامل انتشار الإلكترون في القاعدة $10 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ وزمن حياة الإلكترون 10^{-6} s . احسب سمك القاعدة اللازم للحصول على عامل انتقال القاعدة 0.997.

الحل:

$$\alpha_T = 1 - \frac{W_B^2}{2 L_{nB}^2} = 1 - \frac{W_B^2}{2 D_n \tau_B}$$

$$0.997 = 1 - \frac{W_B^2}{(2) (10) \times (10^{-6})}$$

ومنه:

$$W_B = 2.53 \text{ } \mu\text{m}$$

مثال (1-1):

ترانزستور (*npn*) فى نسق القاعدة المشتركة. فيه:

N_D	=	$5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	إشابة الباعث
N_A	=	$1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	إشابة القاعدة
W_B	=	$1 \times 10^{-4} \text{ cm}$	سمك القاعدة
$D_n = D_p$	=	$20 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$	معامل الانتشار

احسب معامل تكبير التيار α_0 فى نسق القاعدة المشتركة ومعامل تكبير التيار β فى نسق الباعث المشترك. إذا كان زمن حياة الحاملات الاقلية من الإلكترونات والشغرات هو، $s \cdot 10^{-6}$.

الحل:

$$\therefore L = \sqrt{D\tau}$$

$$\therefore L_n = L_p = \sqrt{20 \times 10^{-6}} = 44.7 \text{ } \mu\text{m}.$$

فى نسق القاعدة المشتركة للترانزستور ترتبط الكميات α_0 , γ , α_T بالعلاقة:

$$\alpha_0 = \gamma \alpha_T \quad 6-40$$

$$= \left(1 - \frac{D_p N_A W_B}{D_n N_D L_{PE}}\right) \left(1 - \frac{W_B^2}{2L_{nB}^2}\right) \quad 6-41$$

$$= \left(1 - \frac{(20)(10^{17})(10^{-4})}{(20)(5 \times 10^{17})(44.7 \times 10^{-4})}\right) \left(1 - \frac{(10^{-4})^2}{2(4.47 \times 10^{-4})^2}\right)$$

$$= 0.9953$$

وبذلك تصبح:

$$\beta = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0} = 211.8$$

(٩.٦) النبطة BJT فى الترددات العالفة

High Frequency Behavior of BJT

تعتبر عملفة تكبفر الإشارات الكهرلفة عند الترددات العالفة واحدا من التطبيقات الهامة للترانزفستور ثنائى القطب الوصلف BJT . وتقاس الاستجابة للتردد بقلمة تردد القطع f_T وارنباطه بزمن التأخفر الكلف τ_{ec} الذى ففل تقدم حاملات الشحنة من الباعث إلى المجمع وفعرف بالعلاقة:

$$f_T = \frac{1}{2\pi \tau_{ec}}$$

وفعبفر زمن التأخفر الكلف τ_{ec} عن مجموع أزمنة التأخفر أفرى ومن العلاقة:

$$\tau_{ec} = \tau_e + \tau_{TR} + \tau_d + \tau_c$$

ففث:

زمن شحنة السعة الكهرلفة بفن الباعث والقاعدة.	τ_e
زمن عبور القاعدة.	τ_{TR}
زمن عبور طلفة النضوب ناحية للمجمع.	τ_d
زمن شحن السعة الكهرلفة المصاحبة للمجمع.	τ_c

كما تعطف هذه الأزمنة المختلفة بالعلاقات التالية:

$$\tau_e = r_e C_{je}$$

$$\tau_{TR} = \frac{W_B^2}{2D_b}$$

$$\tau_d = \frac{W_{dr}}{v_s}$$

$$\tau_c = r_c (C_\mu + C_S)$$

حيث تمثل كل من:

r_e	مقاومة الباعث ونحسب من ميل العلاقة بين V_{BE} و I_E .
C_{je}	السعة الكهربية للوصلة.
W_{dc}	سمك طبقة النضوب في وصلة المجمع - قاعدة.
v_s	سرعة التشيع.
W_B	سمك القاعدة.
D_b	معامل الانتشار في قاعدة الترانزيستور ثنائي القطب.
r_c	المقاومة الكهربية المصاحبة للمجمع.
C_μ	السعة الكهربية لوصلة المجمع - قاعدة، (في انحياز عكسي).
C_s	السعة الكهربية بين المجمع المشاب والركيزة.

وللوصول إلى قيمة عالية لتردد القطع يحتاج الأمر إلى:

١ - باعث يتألف من شرائح ضيقة (أى سطح صغير للنبيطة).

٢ - تيار باعث كبيرة لاختزال المقاومة الكهربية r_e .

٣ - منطقة قاعدة رقيقة للغاية (لاختزال τ_{TR}).

٤ - ساعات كهربية طفيلية منخفضة.

هذا مع ضرورة استخدام خامات ذات استجابة فائقة لظواهر الانتقال.

ويلاحظ أنه مع زيادة I_C تزداد قيمة r_e أول الأمر نتيجة لتناقص τ_e ، ومن شحن السعة الكهربية المصاحبة لوصلة الباعث - قاعدة، ثم تعود τ_e للتناقص نتيجة لظاهرة «كيرك» وهى ظاهرة تسبب تمدد منطقة القاعدة إلى داخل المجمع، فتؤدى إلى زيادة زمن عبور القاعدة، τ_{TR} .

مثال (١ - ٧):

ترانزيستور (nnp) وصلى عند $300K$ فيه .

I_E	$= 1.5 \text{ mA}$	تيار الباعث
C_{je}	$= 2 \text{ pF}$	السعة الكهربية لوصلة الباعث - قاعدة
W_B	$= 0.4 \text{ } \mu\text{m}$	سمك القاعدة
D_b	$= 60 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$	معامل الانتشار فى القاعدة
W_{dr}	$= 2 \text{ } \mu\text{m}$	سمك طبقة النضوب عند المجمع
r_e	$= 300 \text{ } \Omega$	مقاومة المجمع
$(C_\mu + C_S)$	$= 0.4 \text{ pF}$	السعة الكهربية الكلية للمجمع

احسب تردد القطع لهذا الترانزيستور .

الحل،

تمطى مقاومة الباعث r_e من العلاقة:

$$r_e = \frac{dI_E}{dV_{BE}} \cong \frac{kT}{qI_E} = \frac{0.026}{1.5 \times 10^{-3}} = 17.3 \text{ } \Omega$$

وهذه تعطى τ_e ، زمن شحن السعة الكهربية المصاحبة لوصلة الباعث - قاعدة

من:

$$\tau_e = r_e C_{je} = (17.3) (2 \times 10^{-12}) = 34.6 \text{ ps}$$

وتحسب زمن عبور القاعدة τ_{TR} من:

$$\tau_{TR} = \frac{W_B^2}{2D_b} = \frac{(0.4 \times 10^{-4})^2}{2 \times 60} = 13.3 \text{ ps}$$

ويكون زمن عبور المجمع τ_d من:

$$\tau_d = \frac{W_{dr}^2}{V_s} = \frac{(2 \times 10^{-4})^2}{1 \times 10^7} = 20 \text{ ps}$$

زمن شحن السعة الكلية المصاحبة للمجمع:

$$\tau_c = r_e (C_\mu + C_S) = 30 (0.4 \times 10^{-12}) = 12 \text{ ps}$$

. . . الزمن التأخير الكلى:

$$\tau_{ec} = 34.3 + 13.3 + 20 + 12 = 79.9 \text{ ps}$$

ومن ثم تصبح قيمة تردد القطع هى:

$$f_T = \frac{1}{2\pi \tau_{ec}} = \frac{1}{2\pi (79.9 \times 10^{-12} \text{ s})} = 1.99 \text{ GHz}$$

وإذا تم مضاعفة تيار الباعث (بفرض عدم تغير أى شيء آخر) فإن τ_e تنخفض إلى النصف وتصبح $f_T = 2.54 \text{ GHz}$.

وعند اختزال سمك القاعدة إلى النصف يصبح زمن عبور القاعدة $\tau_{TB} = 3.3 \text{ ps}$ ، وتصبح $f_T = 2.08 \text{ GHz}$.

فى هذا المثال يتركز معظم التأخير عند وصلة الباعث - قاعدة.

(١٠.٦) الاختراق الكلى Punch - Through

يبين شكل (٦ - ١٠) ترانزستور (npn) يعمل فى طور التشغيل النشط تحت تأثير جهد انحياز عكسى ($V_{CB} = V_1$) حول وصلة المجمع - قاعدة، فيتكون عندها طبقة نفوب سمكها W_2 . وتمثل W_1 سمك طبقة نفوب وصلة الباعث - قاعدة الموجودة تحت تأثير جهد انحياز أمامى V_{BE} .

مع زيادة جهد الانحياز العكسى V_{CB} عند وصلة المجمع - قاعدة من القيمة V_1 فى الشكل (أ) إلى القيمة V_2 فى الشكل (ب) تزداد طبقة النفوب عندها بصورة تناسب مع الدالة V_{CB} ، ويصحب ذلك اختزال سمك القاعدة للحايدة. يعرف هذا السمك بسمك القاعدة الفعال W_B ويحدث فيه انتشار الإلكترونات.

من جهة أخرى نزداد قيمة التيار الإلكتروني I_{En} للباعث مع اختزال سمك القاعدة وفقاً للعلاقة التي وردت من قبل (19 - 6) V :

$$I_n = I_{En} = \left(\frac{q D_n n_{Po} A}{W_B} \right) \left[\exp \left(\frac{q V}{k_B T} \right) - 1 \right] \quad (6 - 19)$$

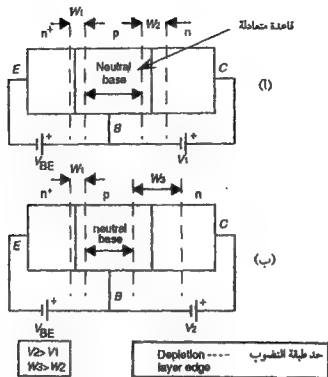
ويُفسر شكل (٦ - ١١) سلوك المنحنيات المميزة للترانزيستور في هذا النسق وهذا الانحيار . مع الاستمرار في زيادة الانحيار العكسي يتزايد اتساع طبقة النضوب عند وصلة المجمع إلى أن تلتقي مع حافة طبقة نضوب وصلة - الباعث - قاعدة فيحدث اختراق كلي يزداد معه شدة تيار الباعث بصورة مطردة مع زيادة V_{CB} ويظل عمل الترانزيستور . وإذا كان سمك قاعدة الترانزيستور كبيراً نسبياً فإنه يحدث أن تنهار وصلة المجمع - قاعدة قبل حدوث الاختراق الكلي .

يمكن حساب قيمة جهد الاختراق الكلي من العلاقة :

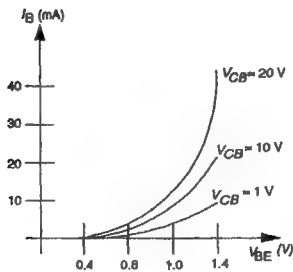
$$V_{Pi} = \frac{q W_B^2 N_A (N_A + N_D)}{2 \epsilon N_D} \quad 6 - 42$$

حيث تمثل $(\epsilon = K \epsilon_0)$ قيمة ثابت العازل لمادة شبه الموصل ، N_D إشابة المجمع ، كما يمكن حساب سمك طبقة النضوب في القاعدة عند الاختراق الكلي من العلاقة :

$$W_B = \left\{ \frac{2 \epsilon (V_{bi} + V_{Pi}) N_D}{q N_A (N_D + N_A)} \right\}^{1/2} \quad 6 - 43$$



شكل (٦ - ١) الانساع للمحايد (المعاد) للقاعدة



شكل (٦ - ١١) منحنيات $(I - V)$ للميزة لترانزستور (npn) في نسق القاعدة المشتركة

مثال (٦ - ٨):

ترانزستور ($n p n$) من السيليكون فيه إشابة القاعدة $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ وإشابة المجمع 10^{16} cm^{-3} . احسب جهد الاختراق الكلى لهذا الترانزستور إذا كان سمك القاعدة عند $0.2 \mu\text{m}$.

الحل:

$$V_{PI} = \frac{q W^2 N_A (N_A + N_D)}{2 \epsilon N_D} \quad \text{بتطبيق العلاقة:}$$

والتعويضات عن الكميات:

$$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \quad W_b = 0.2 \times 10^{-4} \text{ cm},$$

$$N_A = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}, \quad N_D = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$\epsilon_{si} = (11.9) (8.85 \times 10^{-14}) \text{ F/cm} \quad \text{ثابت العازل للسيليكون:}$$

نحصل على:

$$V_{PI} = 9.27 \text{ V.}$$

عند الاختراق، يعطى سمك طبقة نفوب وصلة المجمع - قاعدة، W_C بالعلاقة:

$$W_C = \frac{N_A}{N_D} \cdot W_B \quad \therefore W_C = 1 \mu\text{m}$$

ويصبح الاتساع الكلى لطبقة النضوب عند الاختراق $W_C + W_B = 1.2 \mu\text{m}$ فيكون متوسط شدة المجال عند الاختراق E .

$$E = \frac{V_{PI}}{W_C + W_B} = \frac{9.27}{1.2 \times 10^{-4}} = 7.7 \times 10^4 \text{ V/cm}$$

هذه القيمة من شدة المجال الكهربى تقل كثيرا عما يحتاجه انهيار وصلة المجمع وتقدر بالقيمة التقريبية $4 \times 10^5 \text{ V/cm}$ فى السيليكون. من ذلك نستنتج أنه فى هذا الترانزيستور تكون لألية الاختراق الكلى الغلبة فى انهيار وتحلل هذه النيةطة.

(١١-٦) أنماط (صينغ) التشغيل Modes of Operation

يتميز الترانزيستور ثنائى القطب بوصلتى الباعث - قاعد والمجمع - قاعدة. وتكونان تحت تأثير جهد انحياز أمامى أو عكسى. يؤدى ذلك إلى وجود أربعة احتمالات لنسق الانحياز، تعرف بصينغ أو أنماط تشغيل الترانزيستور وهى:

١-١١-٦ النمط النشط Active Mode

يمثل شكل (٦ - ١٢) ترانزيستور (npn) فى طور التشغيل النشط ويتضح فيه توزيع الحاملات الأقلية فى مناطق الباعث والقاعدة والمجمع إضافة إلى جهد الانحياز الأمامى عند وصلة الباعث - قاعدة وجهد الانحياز العكسى عند وصلة المجمع - قاعدة وقد ورد الحديث عن هذا النمط فى عدة مواضع من هذا الفصل.

٢-١١-٦ نمط التشبع Saturation Mode

فى هذه الحالة تكون الوصلتان عند جهد انحياز أمامى ويكون الترانزيستور فى حالة توصيل قصوى ويعمل كما لو كان مفتاحا (سويتش) مغلقا فى دائرة. فى هذا النمط تكون قيمة V_{CE} صغيرة، حيث يفترض انعدام فرق الجهد عبر الترانزيستور الذى يكون فى حالة غلق، شكل (٦ - ١٣).

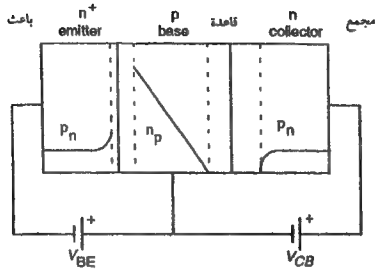
٣-١١-٦ نمط القمع Cut - Off Mode

فيه تكون كلتا الوصلتين عند جهد انحياز عكسى فلا يمرى غير تيارات التسرب العكسية وهى حالة نقيض نمط التشبع حيث يمثل فيه الترانزيستور مفتاحا (سويتش) مفتوحا فى دائرة، شكل (٦ - ١٤).

٤-١١-٦ النمط المعكوس (المقلوب) Inverted Mode

فيه تكون وصلة الباعث - قاعدة، عند جهد انحياز عكسى ووصلة المجمع - قاعدة عند جهد انحياز أمامى؛ ولذلك قد يعرف هذا النمط أيضا بأنه النمط النشط المقلوب حيث يقوم للمجمع بدور الباعث ويقوم الباعث بدور المجمع. والسيار المار فى هذه الحالة يكون صغيرا لعدم توافر شروط الإشابة الضرورية. ففيه أصبحت إشابة «الباعث» صغيرة وإشابة «المجمع» عالية، شكل (٦ - ١٥).

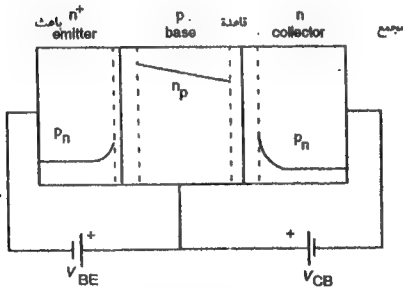
وعلى الرغم من غرابة هذا النمط من التشغيل، إلا أنه يستخدم فى تطبيقات حقن دوائر المنطق المتكاملة.



npn transistor

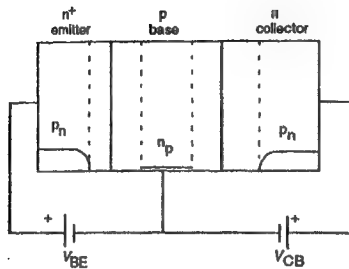
حالة طبقة النضوب

شكل (٦-١٢) ترانزستور (nnp) في النمط النشط



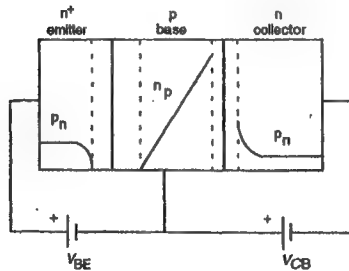
حالة طبقة النضوب

شكل (٦-١٣) ترانزستور (nnp) في نمط التشبع



حالة طبقة النضوب

شكل (٦- ١٤) ترانزستور (npn) في نمط القطع



حالة طبقة النضوب

شكل (٦- ١٥) ترانزستور (npn) في النمط المعكوس

ويعمل شكل (٦ - ١٦) المنحنيات المميزة ($I - V$) لترانزستور (npn) فى نسق الباعث المشترك.

(١٢.٦) تحسين كسب التيار Current Gain Enhancement

تتميز الترانزستورات ثنائية القطب فى الدوائر المتكاملة بنسبة صغيرة جدا من عملية إعادة التحام والتحام حاملات الشحنة . ولقد وجد أن عملية حقن الحاملات الأقلية من القاعدة إلى الباعث تؤدي إلى نقص حاد فى قيمة معامل الكسب . وهناك طريقتان لمنع هذا النقص فى معامل الكسب ، وهما : طريقة الوصلات غير المتجانسة ، وطريقة الباعث عديد التبلور .

١٢.٦-١. الوصلات غير المتجانسة Heterojunctions

يمثل شكل (٦ - ١٧) نماذج شرائط الطاقة فى :

(أ) وصلة عادية (متجانسة) لترانزستور (npn) ثنائى القطب .

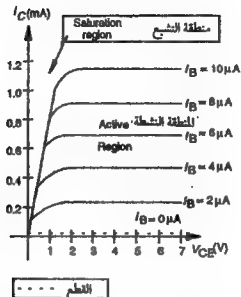
(ب) وصلة ترانزستور (npn) ثنائى القطب فيها باعث ذو فجوة طاقة واسعة .

(ج) وصلة لترانزستور (npn) ثنائى القطب فيها قاعدة ذات فجوة طاقة ضيقة .

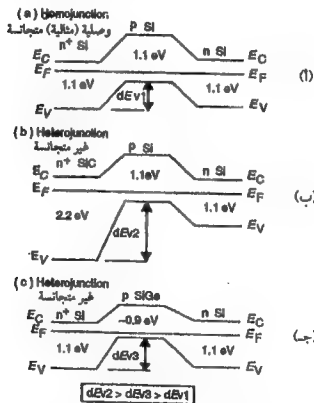
تعرف الحالتان (ب)، (ج) بأنهما لترانزستورات ثنائية القطب ذات وصلات غير متجانسة وذلك لاختلاف مادتي شبه الموصل على جانبي الباعث فى الحالة (ب) وعلى جانبي القاعدة فى الحالة (ج) .

وبدراسة الوصلات فى كل حالة ، نجد أنه فى الحالة القياسية لترانزستور (أ) ليس هناك ما يمنع حقن الشغرات من القاعدة إلى الباعث فى نسق الانحياز الأمامى للوصلة pn . أما فى الحالة (ب) فإن الباعث يتميز بفجوة طاقة واسعة (2.2 eV) وبذلك يمثل عائقا لعملية حقن الشواغر من القاعدة إلى الباعث لارتفاع العائق أمام حركة هذه الشغرات ، وبذلك ينخفض تركيز الشواغر للحقونة انخفاضاً حاداً وفق دالة أسية مع الزيادة الخطية الطفيفة فى ارتفاع العائق وهذا بدوره يؤدي إلى زيادة هائلة فى تكبير التيار . ويمكن الحصول على باعث من شبه موصل يتميز بفجوة الطاقة الواسعة فى المركب «كريد السيليكون» .

يمكن الحصول على نفس النتيجة السابقة باستخدام قاعدة من شبه موصل ذات فجوة طاقة ضيقة (0.9 eV) كما فى مسيكة السيليكون والجرمانسيوم . فى كلتا هاتين الحالتين يتم اختزال كثافة الشغرات المحقونة من القاعدة إلى الباعث إلا أن هناك اختلافاً جوهرياً بين هاتين الحالتين وهو أنه فى حالة الباعث ذو فجوة الطاقة الواسعة يتضمن الترانزستور وصلة واحدة غير متجانسة ، بينما فى حالة القاعدة ذات فجوة الطاقة الضيقة



شكل (٦-١٦) منحنيات ($I-V$) المميزة لترانزستور (npn) في نفس الباعث المشترك



شكل (٦-١٧) نطاقات الطاقة في الوصلات غير المتجانسة

يتضمن الترانزستور وصلتين غير متجانستين واحدة عند وصلة الباعث - قاعدة وهي ضرورية، والآخرى عند وصلة المجمع - قاعدة، وهي غير ضرورية وقد تسبب مشكلات إذا لم يتوخى الحذر عند التعامل معها.

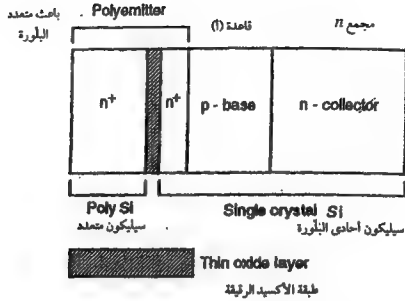
٦-١٢-٢. الباعث متعدد التبلور Polyemitter

هذه طريقة أخرى للحد من حقن الشواغر من القاعدة إلى الباعث وتستخدم فيها نبيطة تحتوى على طبقة رقيقة جدا من أكسيد النحاسور SiO_2 ، سمكها $1\mu\text{m}$ تقريبا وتفصل بين منطقتى القاعدة والباعث، شكل (٦ - ١٨). للحصول على هذه النبيطة عند تصنيع الترانزستور، يترك السيليكون عند منطقة الباعث لينمو فوق سطح أكسيد النحاسور الأمورفى بدلا من إغمائه فوق سطح بلورة أحادية. وبذلك يتشكل الباعث على هيئة سيليكون عديد التبلور. ويتميز أكسيد النحاسور بفجوة طاقة كبيرة فى نموذج نطاق الطاقة، تقدر بوضع إلكترونات فولتية. وتعوق بذلك حركة ناقلات الشحنة، وحيث إن الطبقة المستخدمة من الأكسيد فى الترانزستور رقيقة جدا فإن حاملات الشحنة تخترق هذه الطبقة بمكنة العبور النفقى الكهوى. ونظرا لأن معاملى العبور النفقى للإلكترون يفوق كثيرا عما هو للشغرة فإن طبقة أكسيد النحاسور تسمح للإلكترونات بالمرور خلالها بصورة أسهل من سماحها للشغرات بالمرور. يؤدى هذا إلى الحد من حقن الشغرات إلى الباعث، ومن ثم زيادة هائلة فى تكمير التيار.

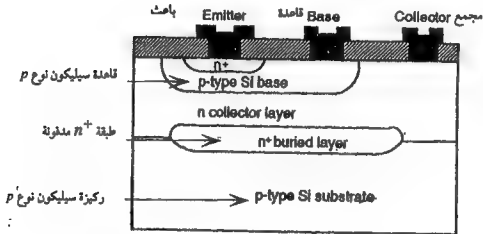
يمكن استثمار الزيادة الهائلة فى تكمير التيار باستخدام أى من الطرق السابقة، لتحسين خواص أخرى فى الترانزستور. على سبيل المثال، فى تلك الترانزستورات التى تم تحسين تكميرها للتيار، يمكن زيادة درجة إشابة القاعدة والعودة بمعامل التكمير إلى قيمتها الأصلية التى كانت عليها قبل التحسين وذلك بغرض إنقاص مقاومة القاعدة بما يؤدى إلى زيادة سرعة أداء النبيطة، ومكون النتيجة أنه فى الترانزستور ثنائى القطب ذى الوصلة أو الوصلات غير المتجانسة أو ذى باعث متعدد البلورة يمكن تحسين سرعة أداء الترانزستور على حساب معامل التكمير العالى.

وتبقى مقاومة القاعدة من المقاومة الأومية فى رقعة الاتصال الكهربائية بين سطح القاعدة والموصل المعدنى الخارجى، شكل (٦ - ١٩) كمقاومة فرعية نتيجة مشكلات فنية عند تثبيت الوصلات الخارجية.

كما أنه يمكن اختزال إشابة الباعث بغرض زيادة سمك طبقة النضوب من ناحيته ويؤدى هذا بدوره إلى اختزال السعة الكهربائية فى هذه الطبقة وكل ذلك أيضا على حساب معامل التكمير العالى فى الترانزستور ذى الوصلة غير المتجانسة.



شكل (٦-١٨) ترانزستور (npn) ذو بأحث متعدد البلورة.



Ohmic contacts تلامس أومي

Oxide insulator عازل أكسيلي

شكل (٦-١٩) ترانزستور (npn) ثنائي القطب مسطح

حساب النقص في معامل التكبير β في نسق الباعث المشترك نعلم من العلاقة (39 - 6) أن:

$$\beta = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0}$$

حيث α_0 معامل التكبير في نسق القاعدة المشتركة ويعطى بعلاقة سابقة (40 - 6):

$$\alpha_0 = \left(1 - \frac{D_p p_{no} W_B}{D_n n_{po} L_{PE}} \right) \left(1 - \frac{W_B^2}{2 L_{nB}^2} \right)$$

وإذا غلب حقن الشغرات عبر وصلة الباعث - قاعدة في الترانزيستور، تتأثر قيمة β وتصبح:

$$\beta \approx \frac{D_n p_{po} L_{PE}}{D_p p_{no} W_B} \quad 6-44$$

عند إشابة الباعث تنقلص فجوة الطاقة E_g فيه وتنكمش بالقدر ΔE_g ويمكن حساب التغير في كثافة الشغرات من القيمة $p_{no}(E_g)$ إلى القيمة $p_{no}(E_g - \Delta E_g)$ من خلال تغير كثافة الحاملات الذاتية وتصبح:

$$p_{no}(E_g - \Delta E_g) = p_{no}(E_g) \exp \left(- \frac{\Delta E_g}{kT} \right) \quad 6-45$$

وبالتعويض عن هذا التركيز في العلاقة (44 - 6) تصبح:

$$\beta = \frac{D_n n_{po} L_{PE}}{D_p p_{no} W_B} \exp \left(- \frac{\Delta E_g}{kT} \right) \quad 6-46$$

وحيث إن:

$$\frac{n_{po}}{p_{no}} = \frac{n_{no}}{p_{po}} = \frac{N_D}{N_A}$$

يصبح التكبير β بدلالة (مستويات) الإشابة N_A, N_D فى العلاقة :

$$\beta = \frac{D_n N_D L_{PE}}{D_p N_A W_B} \exp \left(- \frac{\Delta E_g}{kT} \right) \quad 6-47$$

تبين هذه العلاقة مدى النقص الحادث فى تكبير التيار من جراء إشابة الباعث فى ترانزستور ثنائى القطب متجانس الوصلة. ونقدر قيمة الأكماس ΔE_g فى فجوة طاقة السيليكون:

$$\Delta E_g(Si) = 22.5 \left(\frac{N_d}{10^{18}} \cdot \frac{300}{T(K)} \right)^{1/2} \text{ meV} \quad 6-48$$

أما فى الترانزستور ثنائى القطب ذى الوصلة غير المتجانسة فإن المقدار ΔE_g يمثل الفرق بين فجوى الطاقة فى الباعث والقاعدة وتصبح:

$$\beta = \frac{D_n N_D L_{PE}}{D_p N_A W_B} \exp \left(\frac{\Delta E_g}{k T} \right) \quad 6-49$$

مع بقاء الشرط $L_n \gg W_B$.

مثال (٦ - ٩):

ترانزستور (npn) ثنائى القطب من السيليكون، تتغير فيه إشابة الباعث بين $10^{18} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. احسب التغير فى تركيز الشواغر فى الباعث عند 300 K .

الحل:

تتقلص فجوة الطاقة فى نسبة موصل السيليكون طبقاً للعلاقة:

$$\Delta E_g = 22.5 \left(\frac{N_D(\text{cm}^{-3})}{10^{18}} \cdot \frac{300}{T(K)} \right)^{1/2} \text{ meV}$$

$$\Delta E_g \quad (10^{18} \text{ cm}^{-3}) \approx 0.022 \text{ eV}$$

$$\Delta E_g \quad (10^{22} \text{ cm}^{-3}) \approx 0.225 \text{ eV}$$

فى غياب أى تقلص لفجوة الطاقة فى السليكون، يكون:

$$n_i^2 = 2.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$$

وتقل مع انكماش فجوة الطاقة، ويستخدم العلاقة:

$$p_{no} = \frac{n_i^2}{n_{no}} \exp \left(-\frac{\Delta E_g}{kT} \right)$$

والتعويض عن $n_{no} = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ نحصل على:

$$p_{no} = 5.22 \times 10^2 \text{ cm}^{-3}$$

والتعويض عن $n_{no} = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ نحصل على:

$$p_{no} = 1.26 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}.$$

أى أنه فى حالة الإشابة العالية للمباعت تزداد كثافة الشغرات فيه بدلا من أن تنقص وتتأثر بذلك كفاءة الباعث نائرا شديدا وتقل كفاءته.

مثال (٦ - ١٠)،

ترانزستور (nnp) ثنائى القطب من $GaAs$. فيه $N_D = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ، $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. قارن بين كفاءة هذه النبيطة وكفاءة نبيطة أخرى مائلة الإشابة ولكن ذات وصلات غير متجانسة، ويتكون الباعث فيها من $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ والقاعدة من $GaAs$ علما بأن الترانزستور يتميز بما يلى:

$$D_n = 100 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}, D_p = 15 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}.$$

$$W_B = 50 \text{ } \mu\text{m}, DE_g = 0.36 \text{ eV}, L_p = 1.5 \text{ } \mu\text{m}.$$

الحل:

في حالة شبه موصل $GaAs$ نكون:

$$n_i = 2.2 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$$

$$\therefore p_{no} = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(2.2 \times 10^6)^2}{5 \times 10^{17}} = 9.7 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_{po} = \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(2.2 \times 10^6)^2}{10^{17}} = 4.84 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-3}$$

وتكون كفاءة الباعث:

$$\gamma = \left(1 - \frac{p_{no} D_n W_B}{n_{po} D_p L_p} \right)$$

$$= 1 - \frac{(9.7 \times 10^{-6}) (15) (0.5 \times 10^{-4})}{(4.84 \times 10^{-5}) (100) (1.5 \times 10^{-4})} = 0.99$$

وفي حالة الوصلة غير المتجانسة تنخفض قيمة p_{no} بشدة لتصبح:

$$p_{no}(\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}) = \frac{n_i^2(\text{GaAs})}{N_D} \exp \left(- \frac{\Delta E_g}{kT} \right)$$

$$= p_{no}(\text{GaAs}) \exp \left(- \frac{\Delta E_g}{kT} \right)$$

وبالتعويض عن هذه الكميات نحصل على:

$$p_{no}(\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}) = 9.4 \times 10^{-12} \text{ cm}^{-3}$$

وبذلك ترتفع كفاءة الباعث.

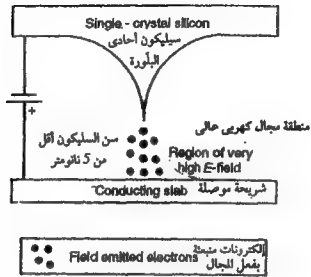
(١٣.٦) الإلكترونيات الدقيقة المفرغة

Vacuum Micro Electronics

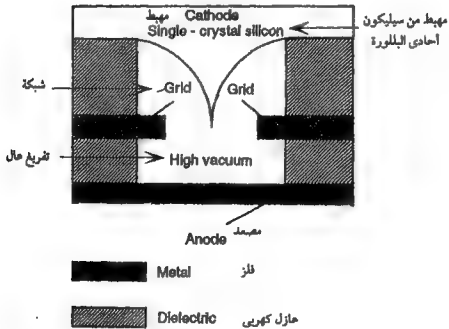
يعتمد الترانزيستور الحالى فى أدائه على حركة ناقلات الشحنة من إلكترونيات وشغرات تحتاج فى اندفاعها داخل شبه الموصل إلى مجال كهبرى . بفعل هذا المجال تصل سرعات انسياق الحاملات حدا لا تتخطاه وتعرف بحد التشبع ، وقد يكون ذلك غير مستحب عند تصنيع نبائط تتطلب أداء فائق السرعة ، يستلزم الأمر اختيار مواد أخرى غير السيليكون للحصول على سرعات انسياق أكبر إلا أنها تظل صغيرة مقارنة بسرعة الضوء فى الفراغ . إضافة لذلك تؤدي التصادمات بين الشحنات ونقاط الشبكة إلى تولد حرارة تكفى لتدمير النبيطة وخاصة عند استخدام التيارات الكهربية الكبيرة ، كما أن وجود نوعين من الشحنة ، إلكترونيات وشغرات وما يتبعها من ظاهرة الحاملات الاقلية غير المرغوب فيها - تولد سعة كهربية بالانتشار ، يؤدي بدوره إلى إبطاء عمل النبيطة .

ما تقدم يتبين وجود أوجه قصور تحد من أداء الترانزيستور ثنائى القطب وتبقى نبيطة غير مثالية .

هناك نبائط إلكترونية ، تتحرك فيها حاملات الشحنة (الإلكترونيات) بسرعة تقرب من سرعة الضوء . لا يعوق حركتها شبكة بلورية ، وبانعدام الشبكة لن يكون هناك ظواهر حرارية معوقة أو تلف إشعاعى من جراء تشعيع نووى ، وتنعبد الأخطاء الطفيفة كما فى نبائط الذاكرة . تعرف هذه النبائط بالصمامات . إلا أن مفهوم هذا الصمام يختلف عما كان من قبل فى حالة الصمامات الإلكترونية المفرغة حيث كانت الشحنات تولد بظاهرة الانبعاث الترميوني داخل أنبوبة رجاجية مفرغة ، تشغل حيزا ضخما فى الفراغ وتحتاج إلى قدرة كهربية عالية لتشغيلها . أما الصمامات البديلة والجديدة فتعرف بالصمامات الإلكترونية الدقيقة الخوائية (المفرغة) ، تقدر أبعاد حجمه الصغير المتناهى بالميكرون وتتولد الشحنات فيها بتأثير مجال كهبرى شديد يؤثر عند سن معدنى مدبب بشكل حاد بظاهرة انبعاث المجال ، شكل (٦ - ٢٠) . كما يبين شكل (٦ - ٢١) نموذجا لهذا الصمام ، ارتفاعه فى حدود $100 \mu m$. يحتاج عمله إلى إلغاء بلورى فائق الدقة مع إبراز سن مدبب حاد باستخدام تقنية حفر التآكل فى السيليكون وثنائى أكسيد السيليكون .



شكل (٦ - ٢٠) انبعاث إلكتروني بتأثير للمجال



Microelectronic 'valve'

شكل (٦ - ٢١) صمام إلكتروني دقيق

(٦-١٤) ملخص الفصل

فى هذا الفصل أخذنا على عاتقنا نمذجة استجابة الترانزيستور ثنائى القطب الوصلى عند وصلة الاستقرار .

فى البداية أجرينا تحليلا مشابها لتحليل الثنائى المثالى بفرض الحصول على توزيع حاملات الاقلية فى القاعدة وبارامترات الاداء والتسيارات الخارجية . ثم قمنا بتبسيط العلاقات العامة .

بالإضافة إلى سعة النضوب السابق ذكرها فى الفصل السابق تعرضنا لمواسعة الانتشار والتي ترتبط أساسا بحقن حاملات الشحنة الاقلية، وتنبهنا بشيء من التفصيل التيارات السارية فى الترانزيستور وتم ربطها بالمعاملات التى يشاع استخدامها للتعامل مع كفاءة النيطه ومنها كفاءة الباعث ومعامل انتقال القاعدة والانتساع الفعال لها وناقشنا ظاهرة الاختراق الكلى .

بعد ذلك قمنا باستعراض أنماط التشغيل المختلفة مثل النشط، التثبيع، القطع . وأخيرا النمط المقلوب .

وتم ربط بارامترات الاداء بالكميات الطبيعية داخل النيطه مثل معاملات الانتشار وتركيزات حاملات الاقلية والانتساع الفعال للقاعدة وأطوال الانتشار . كما أشرنا إلى تردد القطع وهو أقصى تردد بعده الترانزيستور كفاءته .

وفى نهاية الفصل تم استعراض بعض الأساليب لتحسين كسب التيار مثل كبت حقن حاملات الاقلية إلى الباعث .

أسئلة الفصل

١ - ارسم شكلا تخطيطيا يمثل نطاقات الطاقة وكذا بروفيل المجال الكهربى فى ترانزستور n^+pn ، p^+np ثنائى القطب فى حالتى:
(أ) اتزان حرارى .

(ب) انحياز أمامى فى نمط التشغيل النشط .

٢ - بين أنه فى ترانزستور npn ثنائى القطب وذى فجوة طاقة ضيقة ومساحة مقطع A للنبطة، تعطى فائض الشحنة المحقونة بالعلاقة:

$$Q = \left\{ \left[\exp \left(\frac{qV_{BE}}{kT} \right) - 1 \right] + \left[\exp \left(- \frac{qV_{CB}}{kT} \right) - 1 \right] \right\} .$$

٣ - ارسم العلاقة بين عامل نقل القاعدة كدالة للنسبة $\frac{W_B}{L_n}$ فى المدى $10^{-2} < \frac{W_B}{L_n} < 1$ بفرض أن كفاءة الباعث تساوى الوحلة وذلك فى ترانزستور npn ثنائى القطب . بين كيف يتغير معامل تكبير التيار فى نسق المشترك فى نفس المدى المذكور .

٤ - فى ترانزستور npn ثنائى القطب، احسب وارسم اعتماد كفاءة الباعث على النسبة $\frac{N_A}{N_D}$ فى المدى $10^{-2} < \frac{N_A}{N_D} < 1$ وذلك باعتبار:

$$W_B = L_n , \quad L_p = L_n , \quad D_p = D_n \quad (أ)$$

$$W_B = 0.1 L_n , \quad L_p = 0.2 L_n , \quad D_p = 0.2 D_n \quad (ب)$$

٥ - ترانزستور npn ثنائى القطب من السليكون، زاد تصحيحه بحيث تكون كفاءة الباعث γ عند 300 K تساوى 0.995 فإذا كان سمك القاعدة $W_B = 0.5 \mu\text{m}$ ، طول الانتشار $L_p = 10 W_B$ ، ومعاملا الانتشار $D_n = D_p$ وإشابة الباعث $N_D = 1019 \text{ cm}^{-3}$ احسب الإشابة المطلوبة فى القاعدة.

٦ - احسب تردد القطع فى نبطة BJT ، إذا كان زمن عبور القاعدة يمثل 20% من زمن التأخير الكلى لانتقال الشحنات . علما بأن اتساع القاعدة $0.5 \mu\text{m}$ ومعامل الانتشار $D = 25 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$.



الفصل المابع

النبيطة، فلز-أكسيد فلز- شبه موصل،

METAL - OXIDE - SEMICONDUCTOR (MOS) DEVICE

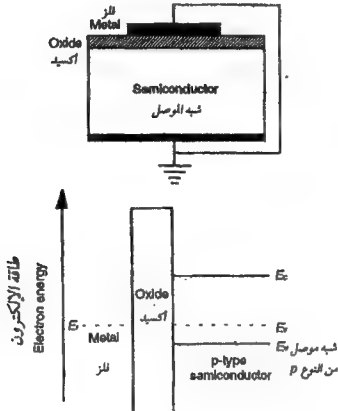
مقدمة
(١-٧) أثر جهد الانحياز
(٢-٧) أشكال نطاق الطاقة في نبيطة MOS
(٢-٧) ترانزيستور تأثير المجال MOSFET
(٤-٧) المنحنيات المميزة لنبيطة MOSFET
(٥-٧) نمط التضوب في نبيطة MOSFET
(٦-٧) تقليص الأبعاد القياسية للنبيطة
(٧-٧) ترانزيستور تأثير المجال الوصلى JFET
(٨-٧) معادلات النبيطة JFET
(٩-٧) ملخص الفصل
استئلة الفصل

مقدمة

فى هذه النبيلة يتم تنمية طبقة رقيقة من أكسيد فلز على سطح ركيزة شبه موصل من النوع n أو النوع p ، ثم يتم وضع قطب فلزى (معدنى) فوق سطح طبقة الأكسيد، ويختار الأكسيد من مادة جيدة العزل الكهربى، تكون فيها فجوة الطاقة كبيرة، وتكون وظيفة هذه الطبقة هى عزل الفلز عن شبه الموصل فلا يمر بينها تيار كهربى.

تعمل هذه النبيلة كثنائى يعرف بالثنائى "MOS" (نسبة إلى الأحرف الأولى من الترجمة الإنجليزية للمكونات)، كما أنها تمثل نوعا من أنواع المكثفات الكهربائية وتسمى بمكثف "MOS". يوضح شكل (٧ - ١) رسما لتركيب هذه النبيلة مع تركيب نطاق الطاقة فيها عند حالة الاتزان الحرارى. ونلاحظ أنه فى غياب فرق الجهد الكهربى وانعدام المجال عبر طبقة الأكسيد، تبدو قمة نطاق الطاقة فيه مستوية وأفقية، وعند تطبيق جهد كهربى على سطح الفلز وتوصيل شبه الموصل بالأرض يميل السطح الأفقى لقمة نطاق طاقة الأكسيد بزاوية ميل تعتمد على اتجاه الجهد المسلط وقيمته. وبين الرسم العلوى فى الشكل أن الفلز انغلق مع شبه الموصل فى دائرة مقصورة. بذلك تقع طاقة لرمى عند مستوى واحد فى كل من الفلز وشبه الموصل، ويمثل بالخط المنقط $E_F - E_F$ ولا يمر تيار كهربى فى أى اتجاه. وكذلك يلاحظ أن نطاقات الطاقة فى شبه الموصل هى الأخرى أفقية ومستوية عند حالة الاتزان الحرارى. تعرف عندئذ بحالة «النطاق المسطح للطاقة»، ومن وجهة النظر الفيزيائية لا يكون هناك مجالات كهربية مؤثرة فى هذه الحالة كما تنعدم توريعات الشحنة الكهربائية وإلا كان هناك انحناء فى نطاقات الطاقة عند الاتزان وفى الواقع، قد يحتوى الأكسيد شحنات عرضية تؤدي إلى انحناء نطاق الطاقة فى شبه الموصل حتى فى حالة الاتزان الحرارى. إضافة لذلك، توجد أيضا مستويات إلكترونية نشطة عند السطح البينى لشبه الموصل والأكسيد تعرف بحالات السطح البينية التى توصف بدقة بميكانيكا الكم، إلا أننا لن نخوض فى هذه التفاصيل. ولذلك تعرف هذه النبيلة بالثنائى "MOS" المثلثى، حيث لم يؤخذ فى الاعتبار شحنات الأكسيد ومستويات السطح البينية وكذلك التوصيل الكهربى بالتسرب. وإذا افترضنا أن لدينا بعض الشحنات فى الأكسيد وتسبب انحناءه لنطاق الطاقة فى شبه الموصل يمكننا عندئذ تطبيق بعض الفولتات على سطح الفلز كى تعادل الأثر الناتج من شحنات الأكسيد ومن

ثم استعادة تسطح مستوى نطاق الطاقة مرة أخرى. يسمى مقدار الجهد المسلط في هذه الحالة بجهد النطاق المسطح، ويمكننا قياس هذا الجهد للتعرف على كمية الشحنة الموجودة في الأكسيد ومنه نتيبن نوع الأكسيد.



شكل (١-٧) ثنائي (MOS) مثالي في حالة إتزان حرارى

(١.٧) أشر جهد الانحياز

يوضح لنا شكل (١-٧) رسماً تخطيطياً لتركيب نيطة فلز - أكسيد - شبه موصل MOS مثالي، يؤثر عليها جهد انحياز عند سطح الاتصال الفلزّي (المعدني). مع تغيير قيمة جهد الانحياز واتجاهه تنشأ في النيطة ثلاث حالات مختلفة هي النضوب، والانقلاب، والتكلس.

١.١.٧ Depletion النضوب

فور تطبيق جهد انحياز سالب عند سطح القطب الفلزي تتكون كمية صغيرة من الشحنتات السالبة عندها، شكل (٧ - ١٢). تمنع طبقة الأكسيد مرور أى تيار كهربى، إلا أن الإلكترونات الموجودة فى ركيزة السيليكون ذى النوع n سوف تتأثر بتلك الشحنتات السالبة وتبتعد متنافرة عن المنطقة الموجودة تحت القطب الفلزي وتتشأ بذلك منطقة نضوب شبيهة بتلك التى تنشأ فى الوصلة n, p . فى هذه المنطقة تنضب الحاملات الحرة وتنفذ.

عندئذ، تبدو طبقتا الفلز والأكسيد كما لو تمثلا بلوح واحد فى مكثف متوازى اللوحين، تكون فيه طبقة شبه الموصل هى اللوح الثانى يفصل بينهما طبقة عازلة هى طبقة النضوب. من هنا سميت النبيطة بمكثف MOS. وفى هذه الحالة يمكن اعتبار طبقة النضوب امتداداً لسمك طبقة الأكسيد هذا على الرغم من أن كلتا الطبقتين لهما ثابتين نفاذية مختلفة. تقل السعة الكهربية للمكثف MOS كلما دفعنا النبيطة نحو النضوب بفعل جهد سالب صغير. يمكن حساب سعة هذا المكثف من العلاقة:

$$C_{ox} = \epsilon_{ox} \frac{A}{d_{ox}} \quad 7-1$$

حيث:

C_{ox} تمثل السعة المقاسة بالفاراد، Farad

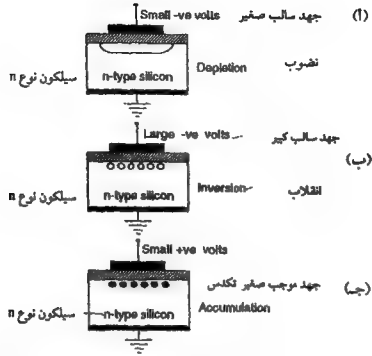
A مساحة سطح المكثف cm^2 .

d_{ox} سمك طبقة الأكسيد cm .

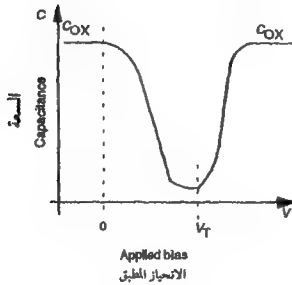
ϵ_{ox} ثابت النفاذية للأكسيد ويمكن تعيينه من العلاقة:

$$\epsilon_{ox} = \epsilon_o K_{ox} \quad 7-2$$

حيث K_{ox} ثابت النفاذية النسبى للأكسيد، ϵ_o ثابت نفاذية الفراغ
 $(\epsilon_o = 8.854 \times 10^{-14} \text{ F/cm})$.



شكل (٢-٧) مثالي على ركيزة من النوع n في الحالات:
(1) النضوب (ب) الانقلاب (ج) التكلس



شكل (٣-٧) منحنى $V - \mu$ للمعز لتنائي MOS مثالي وفيه
يمثل V_T قيمة جهد العتبة

مثال (٧ - ١):

احسب السعة الكهربية للأكسيد في النيةطة MOS، إذا كان قطر سطح الاتصال الفلزى 2mm وسمك الأكسيد 100 nm.

الحل:

بالتعويض عن قيم المعطيات في المعادلة:

$$C_{ox} = \frac{(8.854 \times 10^{-14}) (3.9) (3.14) (0.1)^2}{10^{-5}} = 1.1 \text{ nF}$$

٢-١-٧ الانقلاب Inversion

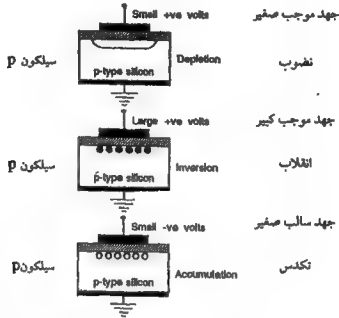
وجد عملياً أنه ليس من الممكن الاستمرار في زيادة الجهد السالب عند سطح القطب المعدنى فى شكل (٧ - ٢ ب) ودفع رقعة النضوب أكثر فأكثر داخل شبه الموصل، فمن وجهة نظر الطاقة يكون مستحباً للشغرات أن تتجمع عند السطح البينى للأكسيد وشبه الموصل بدلاً من الأطراف فى زيادة سمك طبقة النضوب وحين يحدث ذلك، تعرف النيةطة بأنها فى حالة انقلاب وذلك لتغير نوع الشحنات إلى النقيض عند التقاء الأكسيد بشبه الموصل ويصبح هناك وفرة من تلك الحاملات الحرة للشحنة، وهى فى هذه الحالة شغرات موجبة تأتى من الحاملات الأقلية الموجودة فى شبه الموصل n عند درجة الحرارة المعنية وتتجمع فى بئر الجهد أسفل سطح القطب الفلزى عند الانقلاب.

قد يحدث أن تنشأ منطقة نضوب بطريقة سريعة بتأثير نبضة جهد سريعة يمكن بها دفع طبقة النضوب إلى مواضع عميقة داخل السيليكون قبل أن تنافر للشغرات فرصة للزحف نحو السطح البينى لتكوين طبقة الانقلاب. بهذه الوسيلة يمكن بالفعل دفع منطقة النضوب داخل السيليكون إلى مدى أبعد مما يسمح به الانقلاب، بشرط أن يتم ذلك بسرعة فائقة، وتسمى هذه العملية بالنضوب العميق.

٢-١-٨ التكدس (تراكم) Accumulation

عند التأثير على سطح القطب الفلزى فى النيةطة بجهد موجب، تنجذب الحاملات الاغلبية السالبة الشحنة فى السيليكون n وتتكدس عند السطح البينى للأكسيد وشبه الموصل وتكون السعة الكهربية عندئذ هى سعة الأكسيد عند التكدس، شكل (٧ - ٢ ج).

وبين شكل (٧ - ٣) المنحنى المميز $C - V$ لنبيطة MOS مثالية. كما بين شكل (٧ - ٤) رسماً لهذه النبيطة في ركيزة من شبه موصل من النوع p ، وسوف تبرز أهمية النبط الأخيرة عند دراسة النمط المحسن من ترانزستور تأثير المجال.



شكل (٧ - ٤) لناتى MOS مثالى على ركيزة من النوع p فى الحالات:
(أ) النضوب (ب) الانقلاب (ج) التكديس

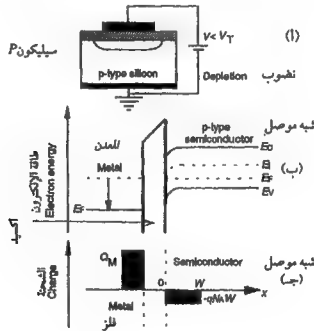
(٧.٧) أشكال نطاق الطاقة فى نبيطة MOS

Band Diagrams in MOS Device

مقارنة لما سبق، نستعرض حالات النضوب والانقلاب والتكديس فى حالة نبيطة MOS على ركيزة سليكون من النوع p . يؤدى تأثير جهد صغير موجب على سطح القطب الفلزي إلى نضوب الحاملات الاغلبية (الشحرات) عند السطح البنى للاكسيد وشبه الموصل، شكل (٧ - ١٥)، إضافة إلى ذلك يمثل شكل (٧ - ٥ ب) نطاق الطاقة للنبيطة. وعند التأثير بالجهد الموجب يتحرك مستوى طاقة فيرمي E_F من موضعه الابتدائى فى حالة الاتزان الحرارى إلى أسفل. كما يوضحه الشكل. ويمثل ميل الخط

المستقيم عند نطاق الطاقة في الأكسيد، الجهد المؤثر عبر طبقة الأكسيد. وينحن نطاق الطاقة الخاص بشبه الموصل قرب السطح البيني له مع الأكسيد، ونظرا لأنه تحت تأثير دفع المجال الكهربائي تهبط الإلكترونات إلى أسفل بئر الجهد بينما تطفو الشغرات لأعلى. كما نجد أن في نموذج النطاق الموضح، أن الشغرات تتحرك متعددة عن السطح البيني وتنشأ طبقة النضوب. يبين شكل (٧ - ٥ ج) توزيع الشحنات لهذه الحالة وفيها تتعادل الشحنات السالبة في وحدة المساحات $qN_A W$ مع الشحنات الموجبة في وحدة المساحات Q_M عند سطح القطب الفلزي وذلك بفرض انعدام أى مصادر أخرى للشحنات. يمثل W سمك طبقة النضوب، ويلاحظ أن مستوى طبقة فرمى في شبه الموصل يكون مستويا وأفقيا كما يتوقع، حيث لا يمر تيار عبر طبقة الأكسيد.

مع زيادة الجهد الموجب عند سطح القطب الفلزي إلى قيمة أعلى من جهد العتبة ينقلب شبه الموصل وتحتل الإلكترونات المكان مكونة طبقة الانقلاب عند السطح البيني للأكسيد مع شبه الموصل، شكل (٧ - ١٦). ومع استمرار زيادة الجهد الموجب يستمر هبوط مستوى طاقة فيرمى في الفلز ويزداد ميل سطح نطاق الطاقة في الأكسيد كما يزداد انحناء نطاق الطاقة في شبه الموصل. شكل (٧ - ٦ ب).



شكل (٧ - ٥) ثنائي MOS مثالي في حالة النضوب

وتعطى كثافة الشحنة الإلكترونية n كدالة للفرق بين مستويى طاقتي فرمي
بالعلاقة (5-10):

$$n = n_i \exp \frac{E_F - E_i}{kT} \quad 5-10$$

وحيث إن:

$$\therefore E_F - E_i > 0 \quad 7-3$$

$$\therefore n > n_i \quad 7-4$$

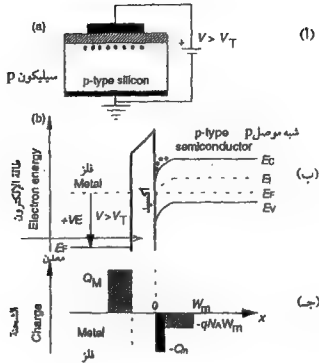
$$\therefore p < p_i \quad 7-5$$

ينقلب سطح شبه الموصل لتفوق عدد الإلكترونات على عدد الشفرات ويكون
سمك طبقة الانقلاب صغيرا جدا، حيث يتراوح بين $10 - 1.0 \text{ nm}$. يمثل سمك طبقة
النضوب W_n فى هذه الحالة أقصى قيمة لها؛ ذلك لأنه بمجرد تكون طبقة الانقلاب فإن
طبقة النضوب تبلغ سمكها الأقصى وأى زيادة أخرى فى الشحنات تظهر فى شحنة طبقة
الانقلاب فقط. وبين شكل (٧ - ٦ ج) تعادل الشحنة الموجبة Q_M عند سطح القطب
الفلزى مع شحنة طبقة الانقلاب السالبة $qN_A W$ وشحنة طبقة النضوب Q_n .

$$Q_M = qN_A W + Q_n \quad 7-6$$

والتأثير بالجهد السالب على سطح القطب الفلزى شكل (٧ - ٦) يفرر نطاقات
طاقة وفق النموذج الممثل فى شكل (٧ - ٧ ب)، يرتفع فيه مستوى فرمي E_F فى الفلز
إلى أعلى عن موضعه الأصيل (الذاتى) عند الاتزان الحرارى، ويأخذ ميل نطاق الطاقة
عند الأكسيد وضعاً معكوساً لتبديل الانحياز عما كان عليه فى الحالتين السابقتين.
ينعكس أيضاً اتجاه الانحناء فى نطاق الطاقة فى شبه الموصل قرب السطح البيني له مع
الأكسيد ويتجه لأعلى، وكما سبق فإنه لا يمر تيار فى الأكسيد ويبقى مستوى فرمي ثابتاً
فى شبه الموصل. تتغير كثافة الحاملات الأغلبية للشحنة p كدالة للفرق $(E_i - E_F)$
وفقاً للعلاقة (5-7).

$$p = n_i \exp \left(\frac{E_i - E_F}{kT} \right) \quad 5-7$$



شكل (٧-١) ثنائي MOS مثالي في حالة الانقلاب

ونتيجة لانحناء نطاق الطاقة لأعلى، تزداد قيمة $E_C - E_F$ وبذلك تزداد كثافة الشغرات مع زيادة الجهد السالب عند سطح النيطة ويؤدي ذلك إلى حالة التكديس. في هذه الحالة تتعادل الشحنة السالبة Q_M للشغرات عند السطح البيني لشبه الموصل والأكسيد كما في شكل (٧-٧ ج). ويبين شكل (٧-٨) رسماً لنيطة MOS على ركيزة سيليكون من النوع p في حالة تُعرَف بالانقلاب الحاد V_{inv} وفيها تحدث أقصى إزاحة لمستوى الطاقة E_F حيث تتحرك بشكل متماثل بين موضع فوق مستوى E_i وقريبا من السطح إلى موضع آخر تحت مستوى E_i بعيدا عن السطح، وتصبح بذلك:

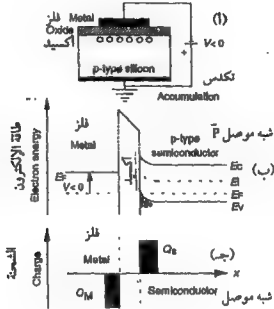
$$V_{inv} = 2V_p$$

7-8

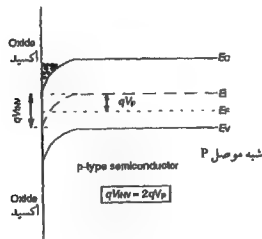
وحيث إنه في الوصلة $p-n$ تتعين V_p من العلاقة (5-8) :

$$V_p = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} \quad 5-7$$

$$\therefore V_{inv} = \frac{2kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} \quad 7-9$$



شكل (7-7) ثنائي MOS مثالي في حالة التكليس



شكل (7-8) الانقلاب الحاد وإزاحة طاقة فرمي E_f

مثال (٧ - ٢):

احسب أقصى قيمة لسمك طبقة النضوب W_m فى ثنائى MOS على ركيزة سيليكون p علما بأن $N_A = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

الحل:

لحساب W_m يمكن استعمال نفس معادلة سمك شحنة الفراغ فى وصلة $(p-n)$ المتبوره - معادلة (41 - 5):

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si} V_{bi}}{2N_D}} \quad 5-41$$

وكى تتمشى هذه المعادلة مع طبقة النضوب فى شبه الموصل p فى الثنائى MOS نأخذ فى الاعتبار ما يلى:

(أ) استبدال كثافة الإشابه N_A بكثافة الإشابة N_D .

(ب) استبدال جهد الانقلاب $(2V_p)$ بجهد البناء الداخلى V_{bi} .

(ج) استبدال أقصى قيمة لسمك طبقة النضوب W_m فى حالة الانقلاب الحاد بقيمة السمك W . وبذلك تتول العلاقة السابقة إلى:

$$W_m = 2 \sqrt{\frac{\epsilon_{Si} V_p}{2N_A}} \quad 7-10$$

بالتعويض عن:

$$\begin{aligned} V_p &= \frac{kT}{q} \exp \frac{N_A}{n_i} \\ &= 25 \times 10^{-3} \exp \frac{5 \times 10^{15}}{1.4 \times 10^{10}} = 0.32 \text{ V} \end{aligned}$$

ويصبح أقصى سمك:

$$W_m = 2 \sqrt{\frac{(8.854 \times 10^{-14}) (11.9) (0.32)}{(1.6 \times 10^{-19}) (5 \times 10^{15})}} = 0.41 \text{ } \mu\text{m}$$

مثال (٧ - ٣):

استنتج معادلة لحساب جهد العتبة في ثنائي MOS مثالي .

الحل:

عند عتبة طبقة الانقلاب يصبح جهد القطب الفلزي V_T مساويا لمجموع جهد الشريط المنحني ($V_{inv} = 2 V_P$) وجهد شحنة طبقة النضوب V_{dep} ذات السمك W_m ، أى أن:

$$V_T = 2 V_P + V_{dep} \quad 7-11$$

ولكن:

$$V_{dep} = \frac{Q_{dep}}{C_{OX}} \quad , \quad C_{OX} = \frac{\epsilon_{OX}}{d_{OX}} \quad \text{سعة طبقة الاكسيد}$$

$$V_T = 2 V_P + \frac{Q_{ds}}{C_{OX}} \quad 7-12$$

وبالتعويض عن:

$$Q_{dep} = -q N_A W_m = -2 \sqrt{\epsilon_{Si} V_P q N_A}$$

يمكن الحصول على العلاقات التالية:

$$V_T = 2 V_P + \frac{q N_A W_m d_{OX}}{\epsilon_{OX}} \quad 7-13$$

$$V_T = 2 \left(V_P + \frac{1}{C_{OX}} \sqrt{\epsilon_{Si} V_P q N_A} \right) \quad 7-14$$

وتستخدم في حساب قيمة العتبة في حالة الانقلاب .

مثال (٧ - ٤):

احسب جهد العتبة V_T لثنائي MOS مثالي من سيليكون p ، إذا علم أن:
 $N_A = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $d_{ox} = 120 \text{ nm}$.

الحل:

من نتائج المثال السابق نعلم أن:

$$V_p = 0.32 \text{ V} , \quad W_m = 0.41 \mu\text{m}.$$

$$\therefore V_T = 2 V_p + \frac{q N_A W_m d_{ox}}{\epsilon_{ox}}$$

بالتعويض عن قيم هذه الكميات نحصل على:

$$\therefore V_T = 2 (0.32) + \frac{(1.6 \times 10^{-19}) (5 \times 10^{15}) (0.41 \times 10^{-4}) (1.2 \times 10^{-3})}{(3.9) (8.854 \times 10^{-14})}$$

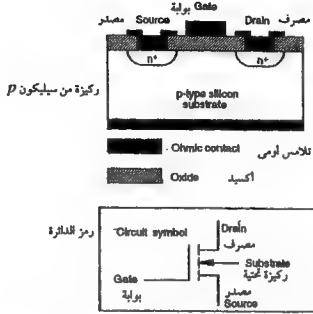
$$= 1.78 \quad \text{V}$$

(٧.٢) ترانزستور تأثير المجال (MOSFET)

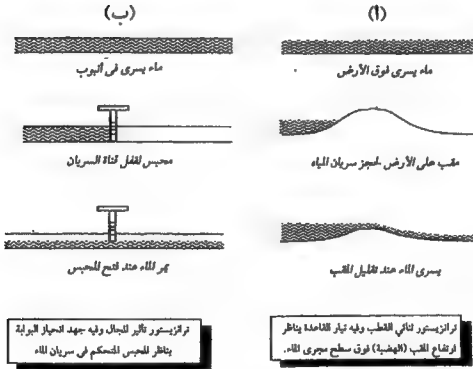
Metal Oxide Semiconductor - Field Effect Transistor

في هذه النبذة يتم إقحام الثنائي MOS داخل ترانزستور تأثير المجال كما يوضحه شكل (٧ - ٩) ويسمى باسم "MOSFET". وما قد عُرف من قبل بالقطب الفلزي عند السطح في النبذة MOS يعرف الآن بالبوابة في النبذة MOSFET في هيئتها الخاصة والتي يطلق عليها نبذة النمط المقوى للقناة n .

ويلاحظ أنه في حالة انعدام الانحياز عند البوابة يكون هناك في شبه الموصل منطقتان مشابتان إشابة عالية n^+ تعرفان على الترتيب بالمصدر والمصرف وتتفصلان عن بعضهما بمنطقة شبه موصل p وتشبهان في ذلك ثنائيان يتصلان ببعضهما ظهرا بظهر كما ورد من قبل في شكل (٦ - ٥). البوابة في نبذة MOSFET تشبه القاعدة في ترانزستور ثنائي القطب، فهو قطب يتحكم في تيارات كبيرة للغاية تشبأ في دائرة بين المصدر والمصرف وتقارن بذلك بالتيار الكهربى المنساب بين الباعث والمجمع، وبين شكل (٧ - ١٠) الفرق بين طريقتى عمل كل من ترانزستور المجال والترانزستور ثنائي القطب.



شكل (٧-٩) النمط المتوى لنهجة MOSFET ذات القناة n



شكل (٧-١٠) الفرق بين طريقة عمل كل من:

(أ) ترانزيستور ثنائي القطب.

(ب) ترانزيستور تأثير الجبال.

أما شكل (٧ - ١١) فيبين نبيلة MOSFET وقد تم توصيلها بمصدرى جهد كهربي، أحدهما لدائرة بين المصدر والمصرف والآخر كجهد انحياز للبوابة. عند غياب جهد البوابة ينزول المصدر عن المصرف ولا يمر بينهما تيار كهربي إلا بقدر ضئيل جدا يعرف بتيار التسرب العكسي. وإذا أثرتنا بجهد موجب على البوابة وزيد من هذا الجهد إلى ما فوق جهد العتبة، تتكون طبقة انقلاب من الإلكترونات التوصيل تحت البوابة (وهذا ما يفسر معنى القناة n في التسمية الواردة للنبيلة). ويلاحظ أن طبقة الانقلاب في هذه النبيلة تتكون بصورة أسهل بكثير عنها في حالة النبيلة MOS وذلك لاحتواء النبيلة MOSFET على منطقتين مشابعتين إثابة عالية n^+ وقربتين من بعضهما البعض، وقادرتين على الإمداد بوفرة هائلة من الإلكترونات إلى طبقة الانقلاب خلال تكونها.

تصل طبقة الانقلاب المصدر بالمصرف بشكل فعال وتسمح للتيار الكهربي أن يمر بينهما. وتؤدي زيادة جهد الانحياز على البوابة إلى دفع مزيد من الشحنات في طبقة الانقلاب وهذا بدوره يزيد من التيار المار بين المصدر والمصرف، ومن هنا ورد لفظ «النمط المقوى» في تسمية النبيلة.

وفي حالة النضوب، تعمل النبيلة MOSFET على توصيل التيار الكهربي دون حاجة إلى جهد انحياز البوابة، وتكون الحاجة إلى هذا الجهد فقط لمنع مرور التيار.

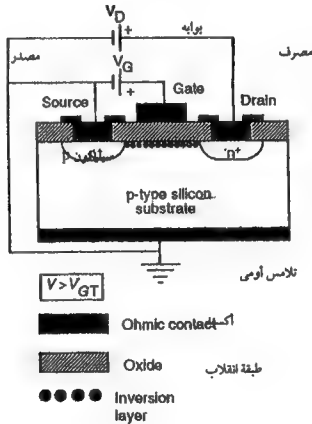
ويلاحظ في شكل (٧ - ١١) أن جهد انحياز المصرف يكون موجبا بالنسبة للمصدر فيصبح المصدر عندئذ مصدرا للإلكترونات نتيجة إثابته السالبة العالية n^+ فيمر تيار الإلكترونات من المصدر إلى المصرف ويمر التيار الاصطلاحي (التقليدي) بالعكس، أي من المصرف إلى المصدر. يتضح من ذلك أنه يمكن استخدام النبيلة MOSFET كمفتاح «مويثش» عن طريق جهد انحياز البوابة، كما يتضح أن هناك تكبير ملموس في شدة التيار الكهربي (لافتراض عدم مرور تيار في البوابة لوقوعها على سطح عازل) ومن ثم تكبير ملموس في القدرة الكهربية. وتشبه النبيلة لترانزستور ثنائي القطب الوصل، غير أن الطرف الثالث والذي عرف بالبوابة لا يسحب تيارا كهريا بالفعل، وبين شكل (٧ - ١٢) المنحنيات المميزة ($I - V$) لنبيلة النمط المقوى للترانزستور MOSFET.

(٤.٧) المنحنيات المميزة لنبيطة MOSFET

MOSFET Characteristics

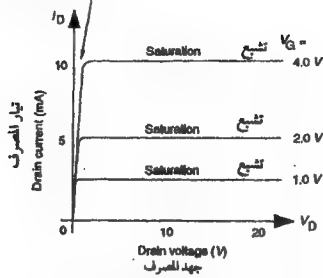
١.٤.٧ التحليل النوعي للمنحنيات المميزة

يبين شكل (٧ - ١٣) النمط المحسن ذا القناة n للترانزيستور MOSFET وهو يعمل في المدى الخطي. يوجد على البوابة جهد أكبر قليلاً من جهد العتبة V_T وبذلك تكون طبقة انقلاب موصلة عند القيم الصغيرة من الجهد الواقع بين المصدر والمصرف تبدو طبقة الانقلاب كما لو كانت شريحة مادية ذات مقاومة أومية عادية تتعین بالعلاقة $V = IR$ ونحصل بذلك على علاقة خطية للمنحنى المميز $I - V$ عند قيم صغيرة من جهد المصرف V_D .

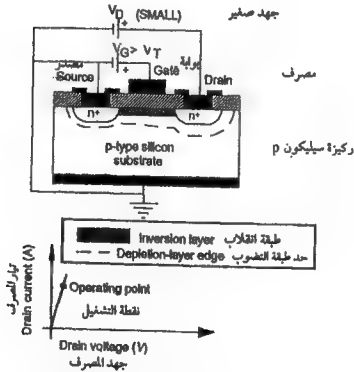


شكل (٧ - ١١) اتحياز المصرف وتكون طبقة الانقلاب في النبيطة MOSFET

Linear region المنطقة الخطية



شكل (٧-١٢) للتحنيات المميزة للتيار MOSFET ذات القناة n



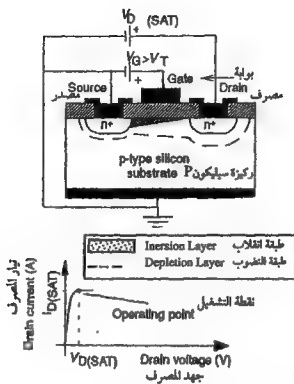
شكل (٧-١٣) تبيطة النمط للمحسن MOSFET ذات القناة n في المدى الخطي للمنحنى المميز

وبين شكل (٧ - ١٤) النبيطة MOSFET عند بدء تيار التشيع بها والتي تناظر $V_{D(sat)}$. إذا اقترب هذا الجهد من القيمة $(V_p - V_n)$ يصبح الجهد على الأكسيد ناحية المصرف غير كاف للإبقاء على طبقة الانقلاب فتختفى. تعرف هذه الحالة بجهد القطع التخصري. من جهة أخرى تظل طبقة الانقلاب باقية ناحية المصدر ويرجع السبب في ذلك إلى وجود المصدر عند جهد صفري، الأمر الذي يجعل الأكسيد ناحية التفاته بالمصدر متأثرا بفرق الجهد الكلي الناتج من جهد البوابة. فإذا فرض أن الجهد الواقع على طول طبقة الأكسيد يتغير تغيرا خطيا فإن سمك طبقة الانقلاب تتغير تغيرا خطيا من القيمة صفر ناحية المصرف إلى أقصى قيمة لها ناحية المصدر كما يظهر في الشكل (٧ - ١٤). ويلاحظ وجود طبقة نضوب في شبه الموصل p قرب التصاقه بالمصرف نتيجة لزيادة الجهد الموجب عليه. ونجد أنه على الرغم من تقلص طبقة الانقلاب إلى الصفر ناحية المصرف، يستمر تيار التشيع $I_{D(sat)}$ في الانسياب عند جهد القطع التخصري وذلك عند استمرار زيادة جهد المصرف V_D .

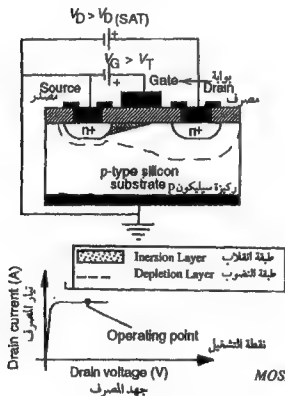
وبين شكل (٧ - ١٥) نبيطة MOSFET عند $V_D > V_{D(sat)}$ وفيها يتحرك جهد القطع التخصري نحو المصدر مبتعدا عن المصرف. غير أن قيمة هذا الجهد تظل ثابتة دون تغير، بذلك تبقى هناك منطقة صغيرة بين مؤخرة طبقة الانقلاب، عند نقطة القطع والمصرف خالية من الشحنات وتمثل منطقة نضوب وعلى الرغم من ذلك فإنها لا تعوق فيض الإلكترونات المناسب من المصدر إلى المصرف ويشبه ذلك ما يحدث من انسياب حاملات الشحنة عبر منطقة النضوب في الوصلة $n-p$ ، في الترانزيستور ثنائي القطب. وتكون طول منطقة النضوب في نبيطة MOSFET عادة صغيرة جدا ويصبح المجال عبرها شديدا للغاية فيعمل على تسريع (تعجيل) الإلكترونات من حافة القطع التخصري في طبقة الانقلاب إلى المصرف (حيث يكون المصرف متأثرا بقدر من الجهد الموجب بينما يكون المصدر عند جهد صفري). وتبلغ شدة المجال المؤثر على الإلكترونات من القوة بحيث تصل سرعة الدفع إلى قيمة التشيع في وقت وجيز للغاية. وتعين شدة التيار بالعلاقة:

$$I_d = n A v_d q$$

7 - 15



شكل (١٤ - ٧) النمط القوي MOSFET ذو القناة n في حال التشبع



شكل (١٥ - ٧) النمط القوي MOSFET ذو القناة n فيما بعد التشبع

فإذا بلغت السرعة V_d حد التشبع $V_{d(sat)}$ يصل التيار I_d أيضا إلى حد التشبع $I_{d(sat)}$ وذلك بفرض ثبات قيمة كثافة الشحنة n التي تصل من الجهد إلى منطقة القطع التخصرى. وهذا بدوره يتوقف على قيمة الجهد عند نقطة القطع وهذه القيمة تبقى ثابتة. أى أنه فور أن يصل جهد المصرف إلى $V_{D(sat)}$ أو يزيد يتشبع التيار ويثبت عند قيمته $I_{d(sat)}$ ويعرف عندئذ بتيار المصرف المشبع. بالتعويض عن قيمة V_d بدلالة تحريكية الإلكترون μ_n وشدة المجال \mathcal{E} فى العلاقة $V_d = \mu_n \mathcal{E}$ نحصل على:

$$I_d = n A \mu_n \mathcal{E} q \quad 7-16$$

بمعرفة طول طبقة الانقلاب L يمكن استبدال شدة المجال \mathcal{E} بقيمة الجهد V_{PO} عند نقطة القطع التخصرى فى طبقة الانقلاب من العلاقة $\mathcal{E} = \frac{V_{PO}}{L}$ وبذلك يصبح تيار التشبع:

$$I_d = \frac{n A \mu_n V_{PO} q}{L} \quad 7-17$$

تبين هذه العلاقة أن تيار التشبع يظل ثابتا بثبوت كل من جهد القطع التخصرى V_{PO} وطول طبقة الانقلاب L . فإذا انكمش الطول L نتيجة زيادة جهد المصرف V_D فإن التيار I_d سوف يزداد ولا يحدث التشبع. ويمكن التغلب على ذلك إذا كان طول طبقة الانقلاب كبيرا جدا بحيث لا يتأثر بأى تغير طفيف فيه مع زيادة قيمة جهد المصرف V_D فيبقى التيار I_d ثابتا. أما إذا تم تصنيع نبيطة MOSFET سريعة للغاية بإقحام بوابة قصيرة الطول لإنقاص زمن العبور عبر الترانزستور فإنه يمكن ملاحظة زيادة شدة التيار I_d مع جهد المصرف V_D . وفى الواقع تصنع النبيطة MOSFET ببوابة طولها واحد ميكرون أو أقل.

٢.٤.٧ التحليل الكمي للمنتحنيات المميزة

فى هذا التحليل سوف نستعين أولا بالنبيطة المقواة MOSFET ذات قناة سالبة من النوع n وتعمل فى المنطقة الحطية (حيث تكون قيمة V_{D} صغيرة).

عندما يرتفع جهد البوابة فوق قيمة جهد العتبة تنشأ طبقة الانقلاب وتصبح Q_n شحنة هذه الطبقة لكل وحدة مساحات.

$$Q_n = - C_{ox} (V_G - V_T) \quad 7-18$$

تمثل C_{ox} السعة الكهربائية لبوابة الأكسيد. وذلك عند $V_G > V_T$. وإذا لم يتحقق الانقلاب. أي عندما تكون $V_G < V_T$ فإن الشحنة تعدم وتصبح:

$$Q_n = 0 \quad 7-19$$

وإذا اعتبرنا شكل (٧ - ١٦) حيث تعمل النبيلة MOSFET في المنطقة الخفيفة نجد أن مقاومة القناة تنقص كلما زادت قيمة V_G بسبب زيادة Q_n . ولو تصورنا محور الإحداثيات z يخترق عموديا مستوى هذه الصفحة، وكان طول القناة L فإنه طبقا للعلاقة ($J_x = \sigma E$) فإن:

$$I_D = A \sigma E = (zx) nq \mu_n E \quad 7-20$$

حيث تمثل σ موصلية القناة (البوابة) بوحدة S/m .

بالتعويض عن شحنة طبقة الانقلاب لوحدة المساحات نحصل على:

$$I_D = z (-Q_n) \mu_n E \quad 7-21$$

وبذلك تكون قيمة تيار السحب:

$$I_D = \frac{z \mu_n C_{ox} (V_G - V_T) V_D}{L} \quad 7-22$$

ويمكن الحصول على الناقلية (المواصلة) الكهربية من العلاقة

$$g_D = \left. \frac{\delta I_p}{\delta V_D} \right|_{V_D} = \frac{z \mu_n \hat{C}_{OX} (V_G - V_T)}{L} \quad 7-23$$

فإذا كانت V_D كبيرة بدت لنا قناة (بوابة) التوصيل بالقطع بالتخصرى كما فى شكل (٧ - ١٧). ونظرا للتغير الخطى لطبقة الانقلاب عبر طول القناة L يمكن استخدام القيمة المتوسطة من Q_n لإيجاد قيمة تيار السحب. وبفرض تدفق تيار التشبع، تصبح:

$$I_{D(SAT)} = z (-Q_n)_{av} \mu_n \mathcal{E} \quad 7-24$$

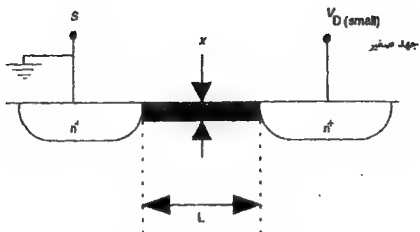
$$I_{D(SAT)} = z \hat{C}_{OX} \frac{(V_G - V_T)}{2} \mu_n \frac{V_G - V_T}{L} \quad 7-25$$

$$I_{D(SAT)} = \frac{z \mu_n \hat{C}_{OX} V_{D(sat)}^2}{2 L} \quad 7-26$$

ويمكن حساب ما يعرف بالناقلية المتعدية g_m (Transconductance) عند التشبع بتطبيق العلاقة:

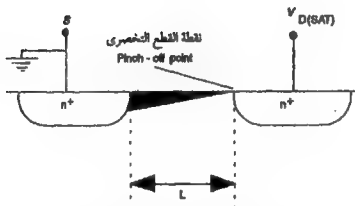
$$g_{m(sat)} = \frac{\delta I_D}{\delta V_G} = \frac{z \mu_n \hat{C}_{OX} (V_G - V_T)}{L} \quad 7-27$$

الناقلية العادية هى قسمة التيار عند موضع ما على فرق الجهد فى نفس الموضع بينما الناقلية المتعدية هى قسمة التيار عند موضع ما على فرق الجهد فى موضع آخر.



⊗ z into plane of paper المحور z الموجب داخل الورقة

شكل (١٦-٧) نبيطة MOSFET
ذات القناة n في المدى الخطي



⊗ z into plane of paper المحور z الموجب داخل الورقة

$$V_{D(SAT)} = V_G - V_T$$

شكل (١٧-٧) نبيطة MOSFET
ذات القناة n عند جهة القطع التحضري

مثال (٧ - ٥):

إذا كانت:

4×10^{-4}	F/m	= السعة الكهربائية لبوابة الأكسيد
50	μm	= عرض القناة
5	μm	= طول القناة
750	cm^2/Vs	= حركية الإلكترون في القناة
6	V	= جهد البوابة
1.5	V	= جهد العتبة

احسب:

(أ) الناقلية المتعدية عند التشبع.

(ب) التكبير في حالة المصدر المشترك بحمل مقاومته $R_L = 25K \Omega$. إذا علمت أن هذا التكبير يعطى بالعلاقة $(-g_{m(sat)} R_L)$.

الحل:

(أ) باستخدام المعادلة (27 - 7):

$$g_{m(sat)} = \frac{(50 \times 10^{-6}) (750 \times 10^{-4}) (4 \times 10^{-4}) (6 - 1.5)}{(5 \times 10^{-6})}$$

$$= 1.35 \times 10^{-3} \text{ S}$$

(ب) التكبير في حالة المصدر المشترك:

$$\text{gain} = -g_{m(sat)} R_L$$

$$= (-1.35 \times 10^{-3}) \times (25 \times 10^3) = -33.75$$

(٥.٧) نمط النضوب في النبيطة MOSFET

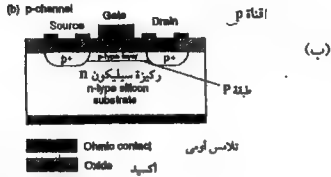
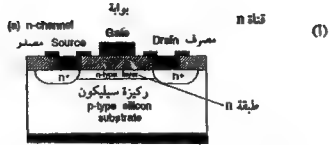
MOSFET Depletion Mode

يبين شكل (٧ - ١٨) التركيب الأساسي للنبيطة MOSFET ذات القناة n في نمط النضوب وفيها قناة الوصل بين المصدر والمصرف. ويتم ذلك بإشابة المنطقة أسفل بوابة الأكسيد عند تصنيع النبيطة. والآن مع وجود قناة التوصيل في موضعها فإن النبيطة MOSFET في نمط النضوب تقوم بالتوصيل ذاتيا بين المصدر والمصرف دون تطبيق أى جهد انحياز على البوابة. بذلك تكون هذه النبيطة في حالتها العادية في وضع الغلق (ON)، بينما يكون الأمر في وضع التوقف (OFF) في حالة النمط المحسن للنبيطة. وعلى ذلك يلزم تطبيق جهد انحياز سالب على بوابة النبيطة MOSFET ذات القناة n في نمط النضوب لقطع الاتصال بين المصدر والمصرف. (ويقدم شكل (٧ - ١٨) نفس النمط في النبيطة ذات القناة p).

وكما هو العهد في حالة نبيطة النمط المحسن تتول قناة التوصيل في نمط النضوب إلى حالة القطع التخصصى مع زيادة قيمة V_D . يبين شكل (٧ - ١٩) بالتفصيل ما يحدث حول منطقتى المصدر والمصرف، فمع انعدام انحياز البوابة وتطبيق جهد انحياز موجب كبير على المصرف تظهر منطقة النضوب كما فى الشكل. تكون رقعة النضوب كبيرة حول المصرف لوجود انحياز عكسى على الثانى n^+p ، حيث تمثل ركيزة الترانزستور الجزء p من الثانى. وينشأ هبوط متوقع فى الجهد الكهربى بين المصرف والمصدر الموجود عند جهد قيمته صفر. وبذلك تنكمش طبقة النضوب بالاتجاه نحو المصدر.

عند قيم أعلى لجهد انحياز المصرف تمتد طبقة النضوب خلال القناة n ويحدث لها قطع تخصصى قرب حافة المصرف.

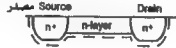
ويلخص شكل (٧ - ٢٠) الحالات الأربعة المختلفة للنبيطة المعنية ومنحنيات ($I - V$) المميزة لكل من هذه الحالات:



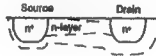
شكل (٧-١٨) لمعد التضوب في نبيطات MOSFET بنوعيهما p, n

MOSFET SCALING

(a) No drain bias بدون اتحياز المصرف



(b) Small drain bias اتحياز مصرف صغير

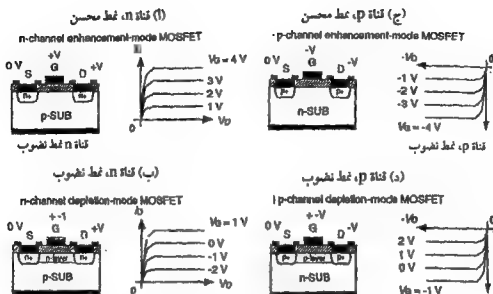


(c) Drain bias above pinch-off اتحياز مصرف يملو القطع التضصري

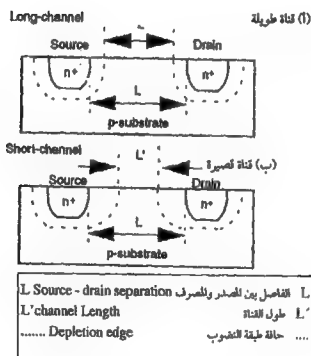


-- Depletion Layer edge حافة طبقة التضوب

شكل (٧-١٩) لمعد التضوب في نبيطة MOSFET ذات القناة n عند القطع التضصري



شكل (١٨-٧) نمط النشوب في نيطات MOSFET بنوعيهما p, n



شكل (٧١-٧) أثر القناة القصيرة

(٦.٧) الأبعاد القياسية للنبیطة MOSFET Scaling

تؤدى الحاجة إلى سبببات ذات سرعة أداء فائقة وكذلك الحاجة إلى سبببات أكثر فى أحد مجالات استخدام السلیکون إلى تصغیر النبیطة بقدر الإمكان عند تصنیعها. إلا أن هناك مشاكل عدة تنشأ كلما آل حجم النبیطة إلى الصفر.

فعلى سبیل المثال یکن اختزال طول القناة لاختصار زمن عبور الشحنات بین المصدر والمصرف. ویین شکل (٧ - ٢١) نبیطة MOSFET بقناة طويلة وأخرى بقناة قصيرة ویوضح من الشکل اریاد طبقة النضوب فى حالة القناة القصيرة. فلذا حدث وكان مجموع سمکی طبقتی النضوب عند المصدر والمصرف مساویا لطول القناة، تندمج طبقتا النضوب. وتنشأ حالة الانهيار الکلى، وتفقد البوابة السیطرة على تیارها وبذلك یفشل عمل النبیطة.

یمثل الانهيار الکلى فى النبببات ذات القناة القصيرة المشكلة الأساسية التى تواجه تقلص حجم النبیطة. ویمکن التغلب جزئیا علیها بزيادة تركیز إشابة الرکیزة فیتقلص سمکی طبقتی النضوب حول کل من المصدر والمصرف.

إضافة إلى ذلك هناك مشكلة الإلكترونات الساخنة. فعند تصغیر طول القناة تزداد شدة المجالات الکهریة المؤثرة ما لم یتم إنقاص الجهد الکهری. هذه المجالات الکهریة العالیة تعجل حاملات الشحنة وتمدها بطاقات عالیة لتزداد حركتها ویطلق علیها عندئذ «الإلكترونات الساخنة»، وهذه تأخذ طریقها داخل بوابة الأكسید وتستوطن فیها كشحنات فائضة بالأكسید فتؤثر بدورها على جهد النطاق المسطح، ومن ثم تغیر فى منحنیات ($I - V$) المیزة للنبیطة وتغیر خصائصها مع الزمن فتصبح النبیطة بذلك معیة ویلزم استبعادها من الاستخدام.

من هذه المناقشة نجد أنه للحصول على نبیطة MOSFET قیاسیة لزم اختزال قیمتی الأطوال والجهد الکهریة بمعامل قیاسی s بحيث نظل قیمة شدة المجالات الکهریة دون تغیر عن حالة القناة الطويلة. وبتطبیق ذلك نجد أن سعة الأكسید لوحدة المساحات C_{OX} تصبح:

$$\bar{C}_{OX} = \frac{\epsilon_{si}}{(d_{OX}/s)} = s C_{OX} \quad , F/cm^2 \quad 7 - 28$$

وتنصح سعة بوابة الأكسيد.

$$\bar{C}_{OX} . A = (s C_{OX}) \left(\frac{L}{s} \right) \left(\frac{z}{s} \right) = \frac{C_{OX} . A}{s} \quad 7-29$$

حيث تمثل L طول البوابة، z سمكها.

كما يصبح تيار المصرف المشبع:

$$\bar{I}_{D(sat)} = \left(\frac{z}{s} \right) = \frac{\mu_n s C_{OX} (V_G - V_T)^2}{(2L/s) s^2} = \frac{I_{D(sat)}}{s} \quad 7-30$$

وتصبح كثافة هذا التيار:

$$\bar{J}_{D(sat)} = \frac{I_{D(sat)}}{A} = \left(\frac{s^2}{A} \right) \frac{I_{D(sat)}}{s} = s J_{D(sat)} \quad 7-31$$

ويمكننا استنتاج أعلى قيمة لتردد التشغيل للبيئة على النحو التالي:

إذا كانت الإلكترونات تعبر البوابة بسرعة دفع (انسياب) مشبعة $v_{D(sat)}$ فإن زمن العبور يصبح:

$$t_{tr} = \frac{L}{v_{D(sat)}} \quad 7-32$$

ويكون أقصى تردد للتشغيل:

$$f_T = \frac{v_{D(sat)}}{L} \quad Hz \quad 7-33$$

و بتطبيق قواعد القياس تصبح

$$\bar{f}_{tr} = \frac{v_{(sat)}}{(L/s)} = s f_{tr} \quad \text{Hz} \quad 7-34$$

وتتأثر باقى عناصر النبىطة بهذه العملية فتبدو كما يلى :

القدرة المستغلّه تقاس (تورن) بالمعامل $(1/s^2)$.

نتائج القدرة المتخلفة تقاس بالمعامل $(1/s^3)$.

القدرة المستغلّه لوحدة المساحات تعابير بمقدار الوحدة فلا تتأثر .

والعنصر الوحيد الذى يتأثر بالزيادة فى هذه العملية القياسية هو كثافة تيار التشبع، حيث تضاعف بقيمة المعامل القياسى s ؛ ولذلك وجب أن نحتاط من مشاكل انسياب الشحنات الكهربية وهجرتها المتدفقة فى النبىطات المتقلصة .

٧-٧) ترانزيستور تأثير المجال الوصلى JFET

Junction Field Effect Transistor

تمثل هذه النبىطة نوعا آخر للترانزيستور فولطى التحكم الانسياقى أحادى القطب . ويمثل شكل (٧ - ٢٢) شكلا تخطيطيا للنبىطة JFET ذات قناة n (أى سالبة القناة).

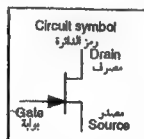
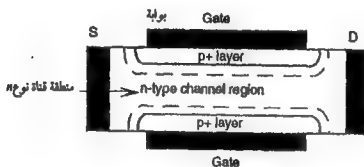
ويتطلب الأداء الفائق للنبىطة دفع الإلكترونات فى الدائرة وأنسب ما يكون لذلك هو ترانزيستور تأثير المجال الوصلى بحيث تقلص المسافة بين المصدر والمصرف إلى أدنى مسافة ممكنة .

تمثل النبىطة JFET فى شكلها البسيط قطعة من السيليكون المقاوم، يتغير قدرة توصيل القناة بها بتطبيق جهد انحياز عكسى عند طرف البوابة . وتبدو ممانعة دخل النبىطة عالية بسبب التحكم عن طريق الانحياز العكسى لوصلة البوابة ويكون التيار المار بالكاد هو تيار التسرب العكسى للوصلة $p-n$.

ويتعين علينا قبل الخوض فى أمر هذه النبىطة وتطبيق أى جهد انحياز على البوابة أن نستعرض حالة القطع التخصصى عند ازدياد جهد المصرف كما كان الحال من قبل مع النبىطة MOSFET

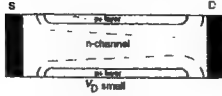
يبر شكل (٧ - ٢٣) كيفية زيادة منطقة النضوب في النبيطة ناحية المصرف مع ازدياد قيمة جهده الموجب، إلا أن هذه المنطقة تقلص منكمشة على هيئة ذيل رقيق، قاعدته ناحية المصدر.

وإذا استمر الجهد الكهربي للمصرف في الزيادة يحدث أن تلتقي منطقتي النضوب ناحية المصرف ويسبب قطع تحضري للقناة، شبه بذات القطع في النبيطة MOSFET. ويستمر مرور التيار دون توقف عند القطع التخصري ويصبح متشعباً. وعند زيادة الانحياز العكسي على البوابة، يقل سمك قناة التوصيل حتى تلتقي منطقتا النضوب ويقطع توصيل القناة، فلا يمر تيار من المصدر إلى المصرف ويظل عمل النبيطة، شكل (٧ - ٢٤).

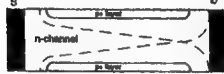


شكل (٧ - ٢٢) رسم تخطيطي لثلاثي-استور تأثير للجيل - الوصل (JFET)

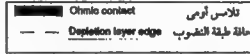
(1) بلاكاد قبل القطع التخصري Just before channel pinch-off



(ب) عند القطع التخصري At channel pinch-off



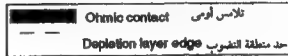
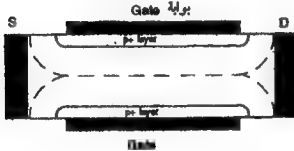
V_D أكبر من جهد
القطع التخصري



شكل (٧٢-٧) القطع التخصري في قناة (JFET)

(أ) قبل حدوث القطع التخصري مباشرة.

(ب) عند حدوث القطع التخصري.



شكل (٧٢-٧) تأثير جهد التحيز البوابة المعكس الكبير

ويفسر ذلك التوقف بأن الانحياز العكسي على البوابة يبلغ من الكبر بحيث يبنى حائط جهد يمنع مرور حاملات الشحنة، الأمر الذى لا وجود له عند التأثير بجهد المصرف وحده.

يمثل شكل (٧ - ٢٥) منحنيات $(I - V)$ للميزة للنيطة JFET بالقناة n . ويتضح فيها أن حالة تشبع التيار (القطع التفضيلى) يحدث عند قيم صغيرة من جهد المصرف كلما زاد الانحياز العكسي للبوابة، ويبطل عمل النيطة بتوقف تيار المصرف مع الزيادة الشديدة للانحياز العكسي للبوابة. يبين هذا السلوك أهمية تأثير المجالات الكهربائية «وليس طبقة النضوب» فى طريقة عمل النيطة، حيث تتوقف حركة ناقلات الشحنة أساسا على تأثير المجالات الكهربائية.

(٨-٧) معادلات النيطة JFET

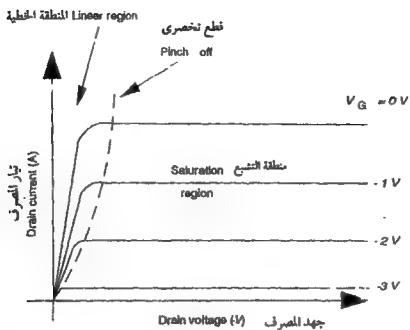
JFET Equations

لإيجاد العلاقة بين قيمتى V, I للنيطة المعينة نستعين بشكل (٧ - ٢٦)، الذى يشير إلى مرور تيار سحب وجود فرق جهد على القناة فى اتجاه المحور y بينما المحور z يتجه عموديا على مستوى الورقة.

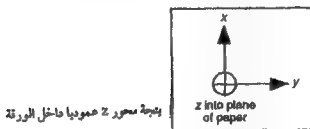
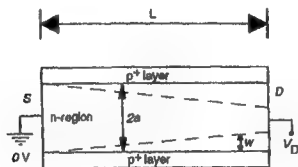
يؤدى فرق الجهد بين طرفى النيطة إلى تولد طبقة نضوب ذات سمك يقل فى الاتجاه من المصرف إلى المصدر. فإذا كان شبه الموصل ذا إشابة n (نيطة ذات قناة n) وكانت البوابة ذات إشابة p^+ عالية التركيز فإننا نحصل بذلك على وصلة n^+p بين البوابة والقناة. وقد وجد من قبل أن العلاقة بين سمك طبقة النضوب W والجهد V المؤثر على الوصلة المبثورة أحادية الجانب وفقا للمعادلة (41 - 5) هى:

$$W = \left(\frac{\epsilon_{si} V}{q N_D} \right)^{1/2} \quad 5-41$$

ذلك مع إهمال قيمة الجهد الصغير الميث داخليا بالنيطة.



شكل (٢٥-٧) منحنيات $I - V$ المميزة للنقطة (JFET) ذات النواة n



اتجاه محور z عموديا داخل الورقة

شكل (٢٦-٧) مخطط لاستنتاج $I - V$

إذا كانت V_p تمثل جهد القطع التخصرى اللازم لقطع التوصيل بالكاد عبر القناة، فإنه بالتعويض عن قيمة W بالقيمة a التى تمثل نصف قمة القناة ينتج أن:

$$V_p = \frac{qN_D a^2}{2\epsilon_{Si}} \quad 7-35$$

مع ملاحظة أن V_p سالبة فى الترانزيستور ذات القناة n . من هاتين المعادلتين نحصل على:

$$W = a \left(\frac{V}{V_p} \right)^{1/2} \quad 7-36$$

ومن الشكل (٧ - ٢٦) يمكن حساب التغير فى قمة (شدة) توصيل القناة h عبر طولها من العلاقة:

$$h = 2(a - W) \quad 7-37$$

وبدلالة الجهد الكهرى تصبح هذه العلاقة:

$$h = 2a \left[1 - \left(\frac{V}{V_p} \right)^{1/2} \right] \quad 7-38$$

وبما أن تيار السحب I_D يعطى بالعلاقة:

$$I_D = -\sigma A \mathcal{E}_y \quad 7-39$$

حيث تمثل σ موصلية القناة، بالتعويض عن قيمتى شدة المجال \mathcal{E}_y عبر القناة ومساحتها A من العلاقات:

$$\mathcal{E}_y = \frac{dV}{dy} \quad , \quad A = hz \quad 7-40$$

فإن :

$$I_D = -\sigma h z \frac{dV}{dy} \quad 7-41$$

ومنها :

$$\int_0^L I_D dy = - \int_{-V_G}^{(V_D - V_G)} \sigma h z dV \quad 7-42$$

وقد أمكن تعيين حدود التكامل من اعتبار النسيطة ذات القناة n . بها جهد انحياز عكسى قيمته $-V_G$ على البوابة وجهد موجب قيمته V_D على المصرف وبذلك نجد أنه :

$$V = -V_G \quad \text{يكون} \quad y = 0 \quad \text{عند}$$

$$V = V_D - V_G \quad \text{يكون} \quad y = L \quad \text{عند}$$

بالتعويض عن h تصبح :

$$I_D = -\frac{2 \sigma h z}{L} \int_{-V_G}^{(V_D - V_G)} \left[1 - \left(\frac{V}{V_P} \right)^{1/2} \right] dV \quad 7-43$$

ويتطبیق الشروط الابتدائية للنسيطة وهى انعدام تيار المصرف I_D بانعدام جهد المصرف V_D فإن :

$$I_D = -\frac{2 \sigma h z}{L} \left[V_D - \frac{2}{3} \frac{(V_D - V_G)^{3/2}}{(V_P)^{1/2}} - \frac{2}{3} \frac{(V_G)^{3/2}}{(V_P)^{1/2}} \right] \quad 7-44$$

وعند حالة التشبع تكون :

$$I_D = I_{D(sat)} \quad , \quad V_{D(sat)} = V_{Gi} - V_P$$

وتصبح علاقة التيار على الهيئة :

$$I_{D(sat)} = -\frac{2\sigma h z}{L} \left[V_G \left\{ 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{V_G}{V_P} \right)^{1/2} \right\} - \frac{V_P}{3} \right] \quad 7-45$$

ويلاحظ في هذه العلاقة أن تيار السحب عند التشبع يكون سالبا في النبطية JFET ذات القناة n ، كما أن الكميات V_P ، V_G تكون أيضا سالبة بينما تكون V_D موجبة.

مثال (٧ - ١):

ترانزستور JFET ذو قناة n ، فيه قمة توصيل القناة $(2a)$ تساوى $2 \mu m$ وطول القناة $10 \mu m$ وسمكها $250 \mu m$ وتركيز الإشابة فيها $N_D = 3 \times 10^{15} cm^{-3}$ فإذا كانت حركية الإلكترون $V_s / 1500 cm^2$ ، ϵ_{Si} تساوى $11.9 \times 8.85 \times 10^{-14}$ ، احسب:

(أ) قيمة جهد القطع التحضري.

(ب) $V_G = -1 V$ عند $V_{D(sat)}$

(ج) $V_G = -1 V$ عند $I_{D(sat)}$

الحل:

(أ) بتطبيق العلاقة :

$$V_P = \frac{qN_D a^2}{2\epsilon_{Si}}$$

$$\therefore V_P = \frac{(1.6 \times 10^{-19}) (3 \times 10^{15}) (10^{-4})^2}{(2) (8.85 \times 10^{-14}) (11.9)} = -2.28 V$$

(ب) :

$$V_{D(sat)} = V_G - V_P$$

$$= (-1) - (-2.28) = 1.28 V.$$

(ج)

$$I_{D(sat)} = -\frac{2 \sigma h z}{L} \left[V_G \left\{ 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{V_G}{V_P} \right)^{1/2} \right\} - \frac{V_P}{3} \right]$$

وبالتعويض عن $\sigma = nq\mu_n$

$$I_{D(sat)} = -3.6 \times 10^{-3} \left[(-1) \left\{ 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{1}{2.28} \right)^{1/2} \right\} - \frac{(-2.28)}{3} \right]$$

$$= -3.6 \times 10^{-3} \left[-1 + 0.441 + 0.76 \right] = -724 \mu A.$$

(٩.٧) ملخص الفصل

فى بداية الفصل ناقشنا ثنائى MOS والذى عرفه بسعة MOS ودرسنا أثر جهد الانحياز بأحواله الثلاثة - النضوب، الانقلاب، التكدس. وتمكنا من حساب السعة المرتبطة بطبقة الأكسيد كتأسيس الفهم الصحيح لعمل النبيلة MOS. اتجهنا إلى أشكال نطاقات الطاقة فى الأنماط المختلفة وإجراء حسابات سريعة لتعيين قيمة V_{inv} (جهد الانقلاب الحاد) واتساع طبقة النضوب ثم تم اشتقاق عتبة الجهد V_T لنبيلة MOS مثالية. بعد ذلك استخدمنا الثنائى MOS لفهم عمل نبيلة MOSFET والنمط المحسن فيه وتحليل كلى ونوعى للمنحنيات المميزة واستعراض خصائص نمط النضوب للنبيلة. مع الإشارة للفرق بين نمطى النضوب والنمط المحسن. وفى الأول تكون النبيلة فى حالة وضع التشغيل On بينما فى حالة النمط المحسن فى الحالة المعتادة يكون الترانزستور فى حالة توقف Off. استعرضنا بعد ذلك المشاكل المتعلقة بتصغير أبعاد النبيلة. وفى النهاية تناولنا نبيلة JFET والتى تعتبر نوعاً للترانزستور نمطى التحكم الانسيابى أحادى القطب، ويتميز بأدائه الفائق.

أسئلة الفصل

- ١ - نبيطة JEFT ذات قناة n من السيليكون، فيها الإشابة p^+ تكافئ 10^{18} cm^{-3} ذرة وإشابة القناة n 10^{17} cm^{-3} ، سمك القناة $0.25 \mu\text{m}$. احسب قيمة الجهد المبيت وكذلك الانحياز اللازم لإحداث القطع التخصري في القناة عند 300K .
- ٢ - نبيطة MOSFET مقواه من Ga As (وهي نبيطة من فلز وشبه موصل) تتميز بما يلي:

الجهد المبيت	0.76 V
إشابة القناة	10^{17} cm^{-3}
سمك القناة	$0.06 \mu\text{m}$

احسب انحياز البوابة اللازم لفتح النبيطة.

- ٣ - في المسألة السابقة، احسب أقصى طول لقناة النبيطة المقواة.

- ٤ - نبيطة MOSFET مثالية ذات قناة p ، فيها:

سمك القناة	$z = 25 \mu\text{m}$
تحركية القناة	$\mu_p = 250 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$
طول القناة	$L = 1.0 \mu\text{m}$
سمك طبقة الأكسيد	$d_{ox} = 500 \text{ \AA}$
جهد العتبة	$V_T = 0.8 \text{ V}$

احسب وارسم تغير قيمة I_D مع V_D عند $0 \leq V_D \leq 0.5$ - عند انحياز بوابة بالقيم $V_G = 0, -1, -2, -3 \text{ V}$.

- ٥ - نبيطة MOSFET - n ، فيها النسبة بين سمك القناة إلى طولها (z/L) يساوى 15، جهد العتبة 0.5 V وتحركية الإلكترون $500 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$ وسمك طبقة الأكسيد 700 \AA احسب تيار المصرف وقيمة المقاومة المتتلة.



الفصل الثامن

الإلكترونيات البصرية

OPTOELECTRONICS

- مقدمة

(١-٨) الثنائى الباعث للضوء

(٢-٨) المواد اللازمة لتصنيع الثنائى الباعث للضوء

(٣-٨) المواد المستخدمة فى التبيطات LEDs للضوء المرئى

(٤-٨) الكواشف الضوئية الوصلية

(٥-٨) الموصل الضوئى

(٦-٨) الترانزستور الضوئى

(٧-٨) كسب الموصلية الضوئية

(٨-٨) الخلية الشمسية

(٩-٨) السيليكون الأمورفى والخلايا الشمسية

(١٠-٨) هياكل الخلايا الشمسية

(١١-٨) أشباه الموصلات والليزر

(١٢-٨) تهيئة الإسكان العكسى

(١٣-٨) ليزر الوصلة المتجانسة

(١٤-٨) ليزر الوصلة غير المتجانسة

(١٥-٨) الشريطى

(١٦-٨) ليزر الوصلة غير المتجانسة المدفونة

(١٧-٨) ملخص الفصل

أسئلة الفصل

مقدمة

برز التفاعل بين الفوتونات الضوئية وأشياء الموصلات كحقيقة علمية فتحت آفاقاً رحبة أمام علم الفيزياء عامة وأشياء الموصلات بشكل خاص. وأخذت أهمية الفوتونات تتعاظم على حساب كل من الإلكترونات والشغرات لما لديها من خصائص تجعلها قادرة على أن تحمل محل ناقلات الشحنة التقليدية. فالأجزاء المختلفة للدارات الكهربائية تتصل ببعضها عن طريق مسالك وممرات وطبقات عديدة فلزية ومبائك أو موصل سيليكوني. هذه الموصلات البينية تحمل الجهود والإشارات الكهربائية من مصادرها الخارجية إلى الرقاقة وبالعكس، من الرقاقة إلى الوسط الخارجي على سندات ربط تتصل عند أطرافها بأرجل معدنية مثبتة في السطح الخلفي للرقاقة. إذا مر تيار كهربى على الكثافة من إلكترونات أو شغرات في هذه الموصلات البينية فإنه يدمرها. السبب في ذلك هو كبر كمية الحركة لهذه الحاملات، فعند السرعات الكبيرة لها يحدث انتقال لكميات الحركة إلى الشبكة البلورية للموصلات البينية فتدمرها أو تتسبب في دوائر مقصورة بين مسالك متجاورة. على النقيض من ذلك تتميز الفوتونات بكميات حركة ضئيلة فإذا حلت كثافة عالية من الفوتونات تتحرك في دليل موجى محل الكثافة العالية من حاملات الشحنة أمكن تجنب هذه المشاكل في الدارات الكهربائية.

إضافة إلى ذلك حين يمر تيار كهربى على التردد من الإلكترونات أو الشغرات، تُشع طاقة تتناسب مع الأس الرابع للتردد. وتنشأ بذلك مشاكل عديدة من التقاط الطاقة المشعة بكافة الموصلات البينية للمجاورة وتداخل المعلومات وحدوث التشويش.

ويمكن التغلب على مثل هذه المشاكل باستخدام تيار فوتونى بتردداته العالية، يمر في أدلة أو موجهاً موجبة، تصنع بحيث تختزل التشويش بكفاءة عالية، ويكون بذلك اللغز الضوئى أقل بكثير من نظيره الكهربى.

يعرف فرع العلوم المبني على تفاعل الفوتونات البصرية مع أشياء الموصلات «بالإلكترونيات البصرية»، وأهم تطبيقاته هي :

١- الذاكرة، حيث تختزن المعلومات رقمياً على أقراص بصرية مدمجة ويمكن قراءتها باستخدام ليزر الحالة الجامدة. وقد أحدثت هذه التقنية ثورة في طرق تسجيل الأصوات والموسيقى والمعلومات.

٢- الاتصالات البصرية، وقد أدت إلى دفع مجالات البحوث في فيزياء أشياء الموصلات وتطويرها.

٣- الشبكات المحلية باتصال عدد من الحاسبات والتابعات ببعضها البعض اتصالا بصريا وتقوم بتبادل المعلومات المختلفة.

٤- النشر والطباعة بالاستعانة بالطابعة الليزرية.

٥- عمليات التوجيه والتحكم فى مجال أسلحة الليزر الموجهة، والتحكم فى الطائرات التى تطير بدون طيار.

وهكذا أصبح شائعا استخدام الفوتونات بدلا من الإلكترونات فى الوصلات البنية للرقائق الإلكترونية، وفى دارات القطع والوصل وما إلى ذلك. وتنقسم نيپطات الإلكترونات البصرية إلى :

١ - نيپطات تحول التيار الكهربى إلى ضوء، منها الثنائى الباعث للضوء (LED) والثنائى الليزر (LD).

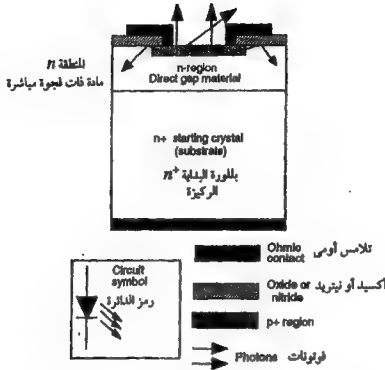
ب- نيپطات تحول النبضات الضوئية إلى تيار كهربى، منها كاشفات الضوء والخلايا الضوئية.

وفيما يلى سوف نستعرض بالتفصيل هذه النيپطات المختلفة.

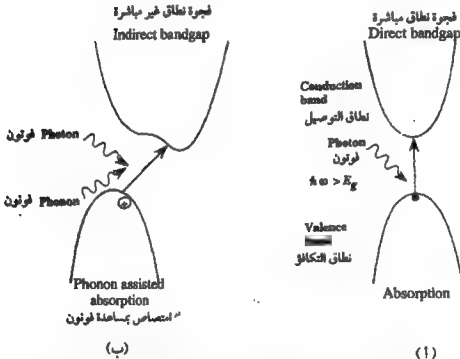
٨-١) الثنائى الباعث للضوء (LED) The Light Emitting Diode

يبين شكل (٨-١) تخطيطا لتركيب الثنائى المشع للضوء مع الرمز الكهربى المعين له. تصنع هذه النيطة من شبه موصل فيه فجوة الطاقة ذو انتقال مباشر، للحصول على كفاءة إشعاع فوتونى مناسب، إلا أنه يمكن لمثل هذه النيطة أن تعمل بكفاءة إشعاع منخفض إذا صنعت من شبه موصل يضم فجوة طاقة ذا انتقال غير مباشر، شكل (٨-٢).

تكمّن آلية انبعاث الفوتونات من هذه النيطة فيما يعرف بالضياية الكهربائية بالحقن. ولإنعام هذه العملية يتطلب الأمر ضخ قدر وفير من الإلكترونات فى منطقة تعج بوفرة من الشغرات (أو العكس) فيحدث العديد من إعادة الالتئام بين نوعى الشحنتين وتنبعث نتيجة لذلك فوتونات. ويبين شكل (٨-١٣) ما يحدث حول منطقة وصلة الثنائى، وفيه نلاحظ أنه نتيجة لتضيق طول الانتشار للإلكترون عما هو فى الشاغرة، تكون رقعة انبعاث الفوتونات ناحية p من الوصلة أكبر مما هى عليه ناحية n ، وقد وجد أنه عند تصنيع النيطة LED يكون من الأفضل الحصول على التركيبية $n^{++}p$ حيث يعمل التلامس مع n^{++} على حقن قدر وافر من الإلكترونات نحو الرقعة p



شكل (٨-١) التركيب الأساسي للتأني الباعث للضوء LED



شكل (٨-٢) فجوة الطاقة في حالتى الانتقال المباشر بامتصاص فوتون (١)، والانتقال غير المباشر بامتصاص فوتون وفونون، وذلك عند انتقال إلكترون من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل (ب).

ليحدث فيها إعادة الالتئام، كما يعمل طول الانتشار للإلكترون على زيادة حجم منطقة الانبعاث على الجانب p من الوصلة، وهذه صورة مبسطة للغاية لتركيب نيطة LED.

فى شكل (٨-٣ب) نماذج لشكلها بعد التصنيع. وتطبيقاتها، شكل (٨-٣ج) وفى الواقع يلزم الأخذ فى الاعتبار كفاءة انبعاث الفوتون فى نوعى شبه الموصل n ، p ، إلا أنه صار معتادا أن يكون هناك فى الغالب حجم انبعاث فوتونى فى ناحية واحدة من الوصلة، وينطبق ذلك على نيطات الليزر أيضا.

مثال ٨-١ :

نقل إلكترون من قمة نطاق التكافؤ إلى قاع نطاق التوصيل فى السيليكون بامتصاص فوتون. احسب التغير فى كمية حركة الإلكترون. وهل يمكن للفوتون أن يمد بهذا الفرق فى كمية الحركة؟

الحل :

تقع النهاية الصغرى لنطاق التوصيل فى السيليكون عند الإحداثيات $(0.85, 0, 0)$ $k = \frac{2\pi}{a}$. وتقع قمة نطاق التكافؤ عند $k = 0$ ، بذلك يكون التغير فى كمية الحركة :

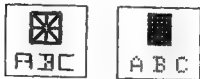
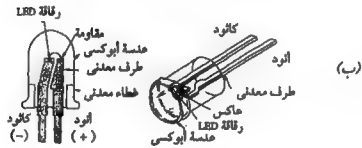
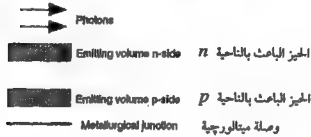
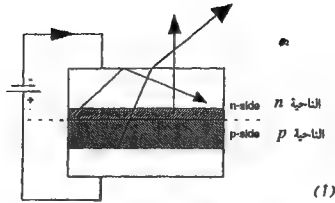
$$\begin{aligned}\Delta P &= \hbar \Delta k = \hbar \frac{2\pi}{a} (0.85) \\ &= (1.05 \times 10^{-34}) \left(\frac{2\pi}{5.43 \times 10^{-10}} \right) \\ &= 1.03 \times 10^{-24} \text{ kg ms}^{-1}\end{aligned}$$

والفوتون الذى له طاقة مساوية لفجوة طاقة السيليكون يمكن أن يمد بكمية حركة قدرها :

$$\hbar k_{ph} = \hbar \frac{2\pi}{\lambda}$$

وبالنسبة لفجوة طاقة السيليكون $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$:

$$\therefore \hbar k_{ph} = \frac{1.05 \times 10^{-34} \times 2\pi}{1.06 \times 10^{-6}} \approx 6 \times 10^{-28} \text{ kg ms}^{-1}$$



شكل (٨-٣)

(أ) مقطع من نبيطة LED قرب الوصلة

(ب) نماذج للنبيطة LED المصنعة

(ج) استخدامات النبيطة في كتابة الأرقام والحروف

وهي كمية تحرك صغيرة جدا لا تحدث التغير الحادث، ويلزم لذلك قدر إضافي من كمية تحرك ذبذبة الشبيكة لحدوث الانتقال، وهذا هو ما يعرف بالانتقال غير المباشر في فجوة الطاقة.

(٢-٨) المواد اللازمة لتصنيع الثنائي الباعث للضوء

Materials for Light Emitting Devices

تحدد فجوة الطاقة في أشباه الموصلات المستخدمة في هذه النييطات، طاقة الفوتون المنبعث منها. فإذا أريد تصنيع نييطة LED تبعث بفوتونات في مدى يمتد من الأشعة تحت الحمراء إلى الأشعة فوق البنفسجية من الطيف الكهرومغناطيسي، لزم البحث عن مواد مختلفة. إلا أنه ليست هناك الآن منظومة أحادية يمكنها أن تغطي هذا المدى من الطاقة على الرغم من أن نيتريدات المجموعتين الثالثة والخامسة تقرب من ذلك.

كما أن أغلب ما يستعمل بكثرة في المجموعتين الثانية والسادسة من أشباه الموصلات ذات الانتقال المباشر مثل المركبات $Zn\ Te$ ، $Zn\ Se$ وغيرهما تكون تلقائياً مشابهة بأى من نوعي الإشابة p أو n ولا تقبل أن يعكس نوعها بزيادة الإشابة لأسباب معقدة ورغم ذلك أمكن تصنيع نييطات تبعث بالضوء الأزرق وأخرى تبعث بالليزر بصعوبة بالغة باستخدام مركبات من المجموعتين الثانية والسادسة، وأيضاً من نيتريدات المجموعتين الثالثة والخامسة وسبائكهما مثل،



وتبقى فجوة الطاقة ذات انتقال مباشر لأى تركيز في مركبات هذه النيتريدات وتساوى $2\ eV$ في المركب $In\ N$ ، $3.3\ eV$ في المركب GaN أما المركب $In\ Ga\ N$ فيمكنه تغطية معظم ألوان الطيف المرئي.

مثال ٢-٨ :

ما مدى الأطوال الموجبة للفوتونات المنبعثة من نييطة باعثة للضوء مصنعة من شبه الموصل $In\ Ga\ N$. وما الألوان الصادرة منها ؟

الحل :

إذا فرض أن هناك تركيزاً واحداً من مركب شبه الموصل المستخدم في النييطة على النحو التالي :

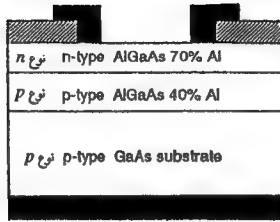
$$10\% Ga, 40\% In, 50\% N$$

فإن هذه المنظومة سوف تبعث بضوء أحادي الموجة.

أما إذا نخلينا النبيطة وقد صنعت من طبقات متدرجة بحيث تتغير المادة رويدا رويدا من Ga N إلى In N فى أى ناحية من الوصلة فى سبيكة In Ga N، بات على الحملات الاقلية المحقونة أن تختار كل هذه الطبقات كى يتسنى إنتاج فوتونات تغطى كافة الأطوال الموجية فى الضوء المرئى بكفاءة. فتنبعث ناحية أقصر طول موجى والمتناظر لأكبر فجوة طاقة ومقدارها 3.3 eV للمركب Ga N، فوتونات طولها الموجى 376 nm وتقع فى منطقة الأشعة فوق البنفسجية. أما فى ناحية المركب In N ذات فجوة الطاقة 2 eV فتنبعث فوتونات بطول موجى 620 μm للون البرتقالى. لحساب هذه الأطوال تستخدم العلاقة المعروفة بين الطاقة (E) بوحدات eV وطول الموجة λ بالميكرون، وهى:

$$E [\text{eV}] = \frac{1.24}{\lambda [\mu\text{m}]}$$

نستنتج مما سبق أن تصنيع النبيطة LED يكون من اشياء الموصلات ذات فجوة الطاقة المباشرة، إلا أنه يصعب تحقيق ذلك على المستوى التجارى. ولمعرفة المواد التى يمكن الحصول عليها لتصنيع النبيطة LED بصورة واقعية نبدأ بتلك التى تبعث بفوتوناتا فى المنطقة تحت الحمراء والتى تتميز بأكبر الطول الموجى وهى منظومة Al Ga As/Ga As، ففيها يمكن إشابة أى من النوعين n, p . وتبقى فجوة الطاقة فى شبه الموصل Al Ga As ذى انتقال مباشر حتى درجة معينة من تركيز الألمونيوم Al وهو بذلك يكون باعثا جيدا للفوتونات. فإذا علمنا أن قيمة فجوة الطاقة فى مركب Ga As تساوى 1.43 eV عند درجة حرارة الغرفة، كان الطول الموجى للفوتونات المنبعثة فى حدود 880 μm . عند زيادة نسبة الألمونيوم فى السبيكة $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ تزداد فجوة الطاقة فى شبه الموصل وتحول من الانتقال المباشر إلى الانتقال غير المباشر عند $x=0.44$ وتصبح قيمتها 1.82 eV فتنبعث عندئذ بفوتون طول له الموجى 633 nm فى مدى اللون الأحمر من الطيف المرئى. يتضح مما تقدم أن منظومة Al Ga As يمكن استخدامها لتصنيع ثنائى باعث للضوء LED يغطى أطوال موجية فى المدى من 880 nm - 633 nm أى من المنطقة تحت الحمراء القريبة وحتى المنطقة الحمراء. ويبين شكل (8-4) اختلافا فى تركيز المركب Al Ga As ناحيتى p, n من الوصلة، وتعرف بالوصلة غير المتجانسة. ويؤدى هذا الاختلاف البسيط إلى كفاءة انبعاث عالية وظهور ضوء أحمر ساطع للنبيطة LED. فالطبقة $p\text{-Al Ga As}$ تحتوى على 40% من وزنها الألمونيوم؛ ولذا فإنها تتميز بانتقال مباشر لفجوة الطاقة. هذه الطبقة هى الباعثة للضوء، وتنتج فوتونات فى المدى 650 nm.



Ohmic contacts ملاسكات أومية

Dielectric هازل
(oxide or nitride) (أكسيد أو نيتريد)

شكل (٤-٨) نبيطة LED حمراء من (Al Ga As / Ga As)

وتمثل طبقة النوع n- Al Ga As، النصف الثاني من الوصلة ويبلغ تركيز الألومنيوم فيها 70% وفيها فجوة الطاقة غير مباشرة وتزداد قيمتها عما هي في طبقة النوع p، وهذا ما يجعلها ذات كفاءة عالية للحقن بالإلكترونات إلى الطبقة p. وتفضل حاملات الشحنة أن تستوطن المواد ذات فجوة الطاقة الأصغر، وبذلك تلازم الإلكترونات الطبقة p وتتخمها فتزداد بذلك عملية إعادة الانشام، ومن ثم تزداد كفاءة النبيطة، كما يؤدي كبر فجوة الطاقة في الطبقة العليا n إلى جعلها طبقة نافذة لأي فوتونات مساقطة عليها؛ ولذلك فهي تنفذ الفوتونات المنبعثة من الطبقة التحتية p بسهولة خلالها.

هذه العناصر جميعها جعلت من الثنائي الباعث للضوء (Al Ga As/Ga As) مصدرا ذا كفاءة انبعاث عالية للضوء الأحمر.

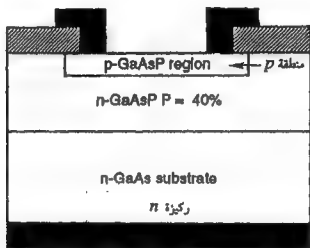
في مجال الاتصالات باستخدام الألياف البصرية، تدعو الحاجة إلى وجود مصدر فوتوني يبعث بفوتونات في مدى الطول الموجي $1.3 \mu\text{m}$ أو $1.55 \mu\text{m}$ للوصول إلى الحد الأدنى للامتصاص والفقد ومن ثم تحقيق أقصى قدرة نقل بهذه الألياف. ولتصنيع نبيطة باعثة للضوء LED أو Laser في هذا المدى من الأطوال الموجية، يستخدم المركب Ga In As P - (جاليوم - إنديوم - زرنيخ - فوسفور)، ويتمى فوق ركيزة من بلورة

فوسفوريد الإنديوم. بتغيير تركيز الشبكة يمكن توليد فوتونات تقع أطوالها الموجية بين ($1-2 \mu\text{m}$) وتتاح الآن أشباه موصلات لتصنيع نسيطات LED تبعث بفوتونات ذات أطوال موجية كبيرة للغاية، وعلى سبيل المثال يمكن للمركبات Pb Sn S ، Pb Sn Te أن تبعث بفوتونات تقع أطوالها الموجية في المدى من $5 \mu\text{m}$ إلى ما يقرب من $50 \mu\text{m}$.

(٣-٨) المواد المستخدمة في النسيطات LEDs للضوء المرئي

Materials for Visible Wavelength LEDs

يعتبر الثنائي الباعث للضوء المرئي أكثر النسيطات شيوعاً في الوقت الحاضر. ويبعث الألوان الأصفر، والأخضر، والكهرماني، والناذر منها يبعث باللون الأزرق، وكما جاء من قبل ينبعث اللون الأحمر من نسيطة Ga As P . وبين شكل (٥-٨) تخطيطاً لهذه النسيطة، وتنمى على ركيزة من رقائق بلورية للمركب Ga As عن طريق تكثيف البخار الكيميائي.



Ohmic contacts ملاصقات أومية

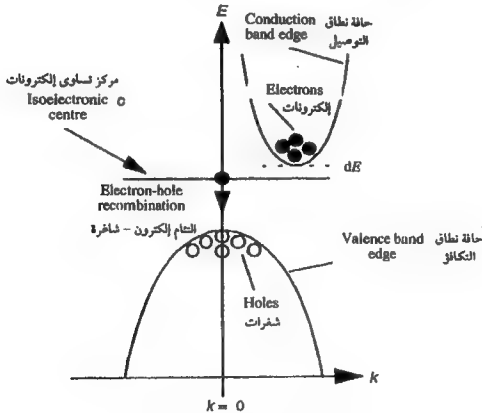
Dielectric (oxide or nitride) عازل (أكسيد أو نيتريد)

شكل (٥-٨) نسيطة LED حمراء من Ga As P فوق ركيزة من Ga As

وجدير بالذكر أن مركب Ga P يمثل شبه موصل غير مباشر، ومع ذلك يمكن استخدامه في تصنيع نسيطة باعثة للضوء الأحمر، وكذلك الحال مع المركب Ga As P

يمكنه أن يبعث بالألوان الأصفر والكهرماني والأزرق. ففي حالات خاصة جدا يمكن إقحام «مركز تساوى إلكترونات التكافؤ» بداخل فجوة طاقة ذات انتقال غير مباشر في شبه موصل لزيادة الالتصام المؤدى إلى انبعاث المزيد من الفوتونات بكفاءة عالية.

ويعنى مركز تساوى إلكترونات التكافؤ أن المركز (العنصر) الدخيل يكون له نفس عدد إلكترونات التكافؤ الموجودة فى العنصر الذى تم استبداله. فمثلا يمكن للتروجين أن يستبدل ببعض الفوسفور فى المركب GaP فيصبح التروجين متساويا إلكترونيا للفوسفور وتلك المنظومة عندئذ سلوكا مغايرا تماما وتبعث بكفاءة إشعاعا أزرق. ويبين شكل (٦-٨) تخطيطا لما يمكن أن يحدث بالتقريب. فإذا أمكن تحديد موقع مركز تساوى إلكترونات التكافؤ بدقة عالية لكونه موقعا لنقطة شبكية، سوف يكون هناك مدى ملحوظ فى تقدير حالة كمية الحركة، طبقا لقاعدة عدم الدقة لهيسنبرج، ويمثل الشكل منحني تغير الطاقة مع كمية حركة المركز وفقا لهذا التصور، وحيث إن عدد إلكترونات التكافؤ متساوية فى كل من المادة الملية وهى أحد مكونات شبه الموصل والمادة الملهبة وهى المركز ذاته فإن هذا الإحلال لا يعتبر إشابة قد تمنح أو



شكل (٦-٨) مركز تساوى إلكترونات التكافؤ

تكتسب إلكترونات من شبيكة المذيب، بل يعتبر المركز كموطن للإلكترونات في مخطط النطاق الإحداثيات $E-k$ لإحداثيات انتقالات إشعاعية فعالة. وعملية الالتصاق الميمنة بالشكل لا يصحبها تغير في قيمة العدد الموجي k ومن ثم لا يحدث تغير في كمية الحركة. وتكافئ هذه الحالة ما قد يحدث في فجوة طاقة ذات انتقال مباشر؛ إلا أن طاقة الفوتون المنبعث تكون أقل من طاقة فجوة النطاق لحث الانتقال الفعال بين مركز تساوى إلكترونات التكافؤ وحافة نطاق التكافؤ ويقدر هذا الفرق dB في شكل (8-7) بحوالى 50 meV في حالة GaP N. ويفيد ذلك في منع امتصاص الفوتون بواسطة شبه الموصل، الذى يصبح في هذه الحالة نافذاً للفوتونات المنطلقة من المادة كضوء، وبذلك ترتفع كفاءة النيطة كمصدر للفوتونات.

للحصول على ضوء في منطقة اللون الأحمر باستخدام GaP، يتم إدخال مركز تساوى إلكترونات التكافؤ يحتوى على كل من Zn، وكذلك O، وقد تستخدم المنظومة GaP : ZnO في تصميم نبيطات تامة الكفاءة، إلا أنها تولد فوتونات طولها الموجي 690 nm وتقع في منطقة الحساسية الضعيفة للعين؛ ولذلك يفضل عليها المنظومة AlGaAs / GaAs في عمل نبيطات تتميز بشدة ضيائية عالية.

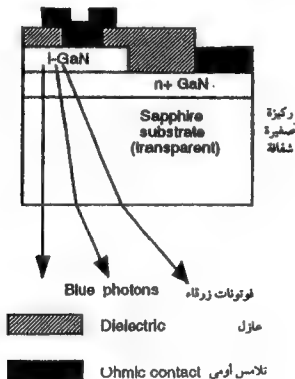
ويمكن تمهاريًا إنتاج نبيطات LEDs للضوء البرتقالي بطول موجي 620 nm والضوء الأصفر بطول موجي 520 nm بإقحام التروجين N كمركز تساوى إلكترونات التكافؤ في شبه الموصل GaAsP. كما يمكن توليد أطوال موجية مختلفة في هذه النبيطات بتغيير تركيز الفوسفور، وكذلك بإقحام التروجين أيضًا في المنظومة GaP يمكن تصنيع نبيطات LEDs للون الأخضر. بذلك نصل إلى ناحية الطول الموجي القصير في مدى الطيف المرئي وهى المنطقة الزرقاء، فتصنع نبيطات LEDs للون الأزرق على المستوى التجارى باستعمال كربيد السيليكون SiC أو نيتريد الجاليوم GaN. غير أن هاتين المادتين لهما عيوب حادة تجعل هذه النبيطات غير فعالة للأسباب التالية:

- يتميز كربيد السيليكون بكفاءة منخفضة عند استعماله كمادة في ثنائى باعث الضوء، حيث يمتلك فجوة طاقة غير مباشرة وليس له ما يناظره كمركز تساوى إلكترونات التكافؤ.

- الانتقال المؤدى لانبعثات الفوتون الأزرق يقع بين النطاقات ومراكز الإشابة في SiC. ويستخدم التروجين في إشابة النوع n من هذه النبيطات، بينما يستخدم الألومنيوم في إشابة النوع p منها.

- درجة الصلادة الفائقة للمركب SiC مع درجة حرارة التشغيل المرتفعة تزيد من صعوبة استعماله في تصنيع النيطة.

أما بالنسبة لنيتريد الجاليوم GaN فهو على الرغم من تميزه كشبه موصل ذي فجوة طاقة مباشرة إلا أنه لا يمكن الحصول على النوع p منه، وذلك لنموه بشكل تلقائي على هيئة n^{++} وتصنع النيطة الخاصة به بتكوين طبقة من الموصل الذاتي GaN باستعمال إشابة مركزة من الزنك. ويحدث الانبعاث الضوئي إذا تم حقن الإلكترونات من طبقة n^{++} GaN إلى منطقة شبه الموصل الذاتي المشاب بالزنك Zn، ويبين شكل (٧-٨) نموذجاً تقريبياً لهذه النيطة. وتشير في هذا السياق إلى أن عمليات إعادة الالتئام التي تؤدي إلى توليد فوتونات قد تشمل مراكز شوائب الزنك. والانبعاث الفوتوني من مثل هذه المراكز يقل في كفاءته كثيراً عن كفاءة الانبعاث الناتج من عمليات الانتقال بين نطاقات الطاقة. ويمكن ترتيب كفاءة الانبعاث في أشباه الموصلات على النحو التالي :



شكل (٧-٨) ثنائي باعث الضوء الأزرق

(أ) عمليات الالتئام عند الانتقال من نطاق طاقة إلى آخر وذلك فى أشباه الموصلات ذى فجوة الطاقة المباشرة .

(ب) إعادة الالتئام عن طريق مراكز تساوى إلكترونات التكافؤ .

(جـ) إعادة الالتئام عن طريق الشوائب فى مراكز تساوى إلكترونات التكافؤ .

(د) إعادة الالتئام عن طريق الانتقال من نطاق طاقة إلى آخر فى أشباه الموصلات ذى فجوة الطاقة غير المباشرة .

ويتضح مما تقدم أنه يمكن عمل نيبطات ذات كفاءة منخفضة للون الأزرق بشكل تجارى ، أما إذا أمكن الحصول على أى من النوع p من شبه الموصل GaN أو مركز تساوى إلكترونات التكافؤ لمركب كريد الكالسوم SiC فإنه يمكن الحصول على نيبطات LEDs تبعث باللون الأزرق الساطع .

مثال ٨-٣ :

يبين الجدول التالى (٨-١) بيانات تخص نيبطة LED

جدول (٨-١)

الضوء المنبعث Light	التيار الأمامى I_F (mA)	الجهد الأمامى V_F (V)	طول الموجة λ (nm)
Red	10	2	635
Green	10	2	662
Yellow	10	2	585

حيث تمثل V_F جهد الانحياز الأمامى ، I_F التيار الأمامى فى النيبطة . فإذا كان تركيب الشائى $n^{++}p$ والتيار المار معظمه من الإلكترونات . احسب لكل نيبطة بالجدول ما يلى :

(أ) طاقة فجوة النطاق لشبه الموصل .

(ب) القدرة الضيائية المنبعثة فى النيبطة بفرض أن كفاءة انبعاث الفوتونات 30% .

(جـ) الطاقة الداخلية للشائى .

(د) النسبة الكلية بين الكفاءة الكهربية إلى الكفاءة الضيائية .

الحل :

(١) بتطبيق المعادلة :

$$E = \frac{1.24}{\lambda}$$

حيث E طاقة فجوة النطاق بوحدة eV، λ الطول الموجى بوحدة μm ،
نحصل على:

$$E (\text{Red}) = 1.953 \text{ eV}$$

$$E (\text{Green}) = 2.206 \text{ eV}$$

$$E (\text{Yello}) = 2.120 \text{ eV}$$

(ب) من تعريف التيار بأنه معدل الشحنات المتدفقة Q فى وحدة الزمن t :

$$\therefore I = \frac{Q}{t} = \frac{nq}{t} = 10 \times 10^{-3} \text{ A}$$

حيث q تمثل شحنة الإلكترون، n عددها. بذلك يصبح عدد الإلكترونات n
المارة فى وحدة الزمن:

$$n = \frac{10^{-2}}{q}$$

وتصبح القدرة الضيائية P_0 :

= نسبة الكفاءة \times عدد الإلكترونات فى الثانية \times طاقة الفوتون

$$\therefore P_0 = (0.3) \left(\frac{10^{-2}}{q} \right) (h\nu)$$

بالتعويض عن المقدار $\left(\frac{h\nu}{q} \right)$ بقيمة فجوة الطاقة لشبه الموصل نحصل على
القدرات الضيائية للنبائط على النحو التالى :

$$P_o (\text{Red}) = 5.86 \text{ mW}$$

$$P_o (\text{Green}) = 6.62 \text{ mW}$$

$$P_o (\text{Yellow}) = 6.36 \text{ mW}$$

(ج) تعطى القدرة الكهربائية للنبائط من العلاقة $P_B = I_F V_F$:

$$\therefore P_B (\text{Red}) = 20 \text{ mW}$$

$$P_B (\text{Green}) = 20 \text{ mW}$$

$$P_B (\text{Yellow}) = 21 \text{ mW}$$

(د) النسبة الكلية (X) للكفاءة الضيائية إلى الكفاءة الكهربائية للنبائط تصبح :

$$X (\text{Red}) = \frac{5.86}{20} = 29.30\%$$

$$X (\text{Green}) = \frac{6.62}{20} = 33.10\%$$

$$X (\text{Yellow}) = \frac{6.36}{21} = 30.30\%$$

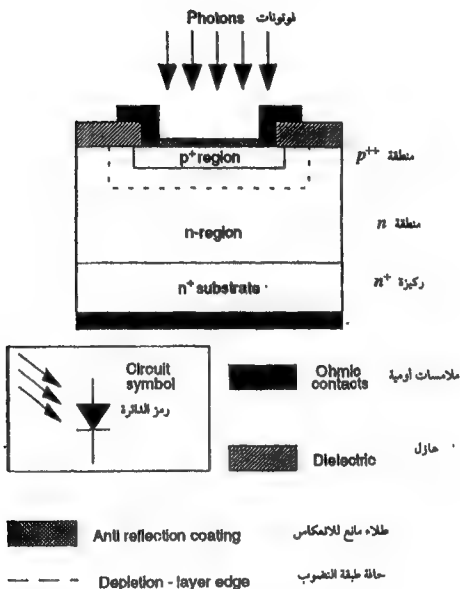
(٤-٨) الكواشف الضوئية الوصلية Junction Photodetectors

قد يكون ثمة تماثل بين الموصلات الضوئية والموصلات الضوئية الوصلية. فالموصلات تنتج الفوتونات عند التأثير عليها بجهد انحياز أمامى على الوصلة pn بين شبهى موصل. أما فى الكواشف، فيمكن الكشف عن فوتون بتطبيق جهد انحياز عكسى على الوصلة. ويجب عند اختيار مادة الكاشف أن تكون ذات فجوة طاقة مناسبة تماما لعملية الكشف ودون حاجة إلى شبه موصل مباشر.

يبين شكل (٨-٨) تخطيطاً مبسطاً لكاشف ضوئى وصلى مع الرمز الكهربى المميز له. ومثل هذه النبيلة تصنع باستخدام تقنية السيليكون، وفيها تسقط الفوتونات على سطح النبيلة فإن كانت طاقتها كافية، ولدت أزواجا من الإلكترونات والشحرات ولتجنب انعكاس الضوء، يطلّى سطح النبيلة بطبقة رقيقة أحادية أو مركبة من مادة

عازلة كهريبا وممانعة للانعكاس. وبالاختيار المناسب لسمك الطبقة يمكن اختزال الانعكاس عند قيمة معينة من الطول الموجي λ للضوء الساقط. فإذا كانت E تمثل قيمة فجوة شبه الموصل في النيةطة فإن:

$$E \text{ [eV]} = \frac{1.24}{\lambda \text{ [}\mu\text{m]}}$$



شكل (A-8) كاشف ضوئي سيليكوني والرمز المميز له

وباستخدام هذه المعادلة يمكن حساب قيمة طول موجة القطع التي تميز أشباه الموصلات المختلفة كما يعرضها الجدول (٨-٢) التالي :

جدول (٨-٢) طول موجة القطع في عدد من أشباه الموصلات

شبه الموصل	شجوة الطاقة E (eV)	طول موجة القطع λ (μm)
السيليكون	1.1	1.13
الجهيرمانسيوم	0.67	1.85
زرنيخيد الجاليوم	1.43	0.87
فوسفوريد الجاليوم	2.26	0.55

ويوضح الجدول أن السيليكون يمكنه الكشف عن فوتونات ذات أطوال موجية تكاد تقع في منطقة الأشعة تحت الحمراء، ولذلك يعتبر كاشفا جيدا لهذه الموجات القصيرة نوعا ما. وبين شكل (٨-٩) مخططا لنطاقى الطاقة لوصلة pn في السيليكون تحت تأثير انحياز عكسى وتولد أزواجاً من الإلكترونات والشغرات نتيجة لسقوط فوتونات على السطح العلوى للنبيطة. أحد هذه الأزواج داخل طبقة النضوب واثان خارجها عند الأطراف المتعادلة. ويلاحظ مدى كفاءة الانفصال بين الشحنتان بالنسبة لأزواج حاملات الشحنة على منحدر الطاقة داخل طبقة النضوب وذلك بفعل المجال الكهربى القوى والكافى لأن يفصل بين الشحنتان عند تشبع سرعة الانسياب. تصل الشحنتان إلى الوصلات الأومية الطرفية وعبر التيار فى دائرة خارجية. وقد يمر التيار أيضا إذا تولدت أزواج الإلكترون والشغرات فى مدى طول الانتشار فى المنطقة المتعادلة قرب حافى طبقة النضوب، ولذلك تنتشر الشحنتان نحو حافة طبقة النضوب وتعبها سريعا إلى الدائرة الخارجية.

وتعتمد عملية امتصاص الضوء فى أشباه الموصلات على الأطوال الموجية كما أنها تخضع للعلاقة الأسية التالية :

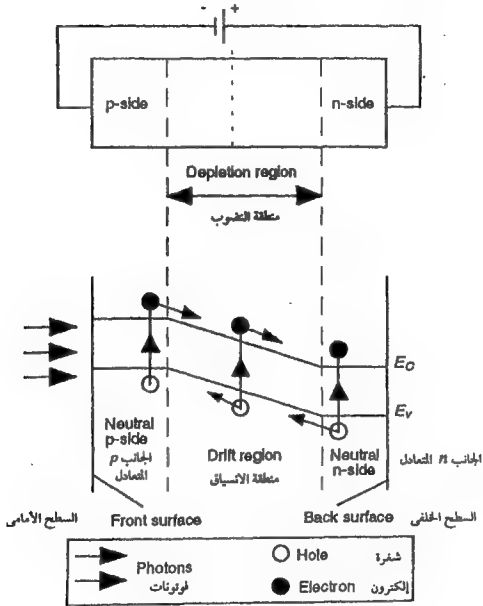
$$I = I_0 \exp (-\alpha x)$$

حيث تمثل .

I_0 شدة الفوتونات الساقطة بوحدة وات / متر مربع

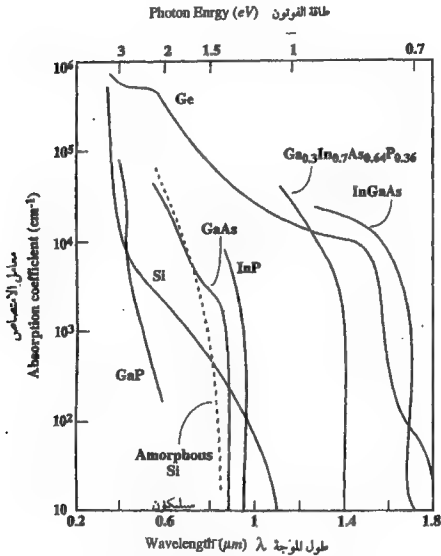
I شدة الفوتونات عند عمق x (متر) داخل السيليكون.

α معامل الامتصاص لكل وحدة طول.



شكل (٨-٩) كاشف ضوئي سيليكوني والرمز المميز له

وتتعاظم قيمة معامل الامتصاص كلما قصرت الأطوال الموجية، شكل (٨-١٠) الذى سبق ذكره فى الفصل الثالث؛ ولذلك لا تنفذ الفوتونات شديدة القصر كثيرا إلى داخل السيليكون لتتمام امتصاصها قرب السطح، كما أن الأزواج المتولدة عنها يعاد التامها قبل الاقتراب من منطقة النضوب فلا يحدث انفصال بين الشحنات. وهكذا تعجز الوصلة المدفونة فى شكل (٨-٩) عن كشف أمثال هذه الفوتونات. وهكذا نجد أنه للكشف عن فوتونات الموجات القصيرة يلزم أن تقترب الوصلة من



شكل (٨-١٠) العلاقة بين معامل الامتصاص وطول موجة (طاقة) الفوتونات الساقطة لعدد من أشباه الموصلات

سطح السيليكون ويتحقق ذلك باللجوء إلى ثنائي يتألف من فلز وسبه موصل، يعرف بثنائي شوتكى وفيه تعمل طبقة الفلز الرقيقة كوصلة تقويم مع سطح شبه الموصل. وللحصول على كاشف ضوئى جيد، علينا أن نوسع منطقة النضوب لامتصاص أكبر قدر ممكن من الفوتونات الساقطة، ولتحقيق ذلك يلزم تطبيق جهد انحياز عكسى كبير مع تقليل إشابة أحد جانبي الوصلة. أما إذا تطلب الأمر تصنيع كاشف سريع، لزم الإقلال من عمليات الانتشار البطيئة، ويتحقق ذلك بترقيق جزء السيليكون الذى يعلو الوصلة مع زيادة درجة إشابته، بذلك نتجنب امتصاص الفوتونات فى المنطقة المتعادلة، وقد يودى هذا إلى تباطؤ عملية انتشار حاملات الشحنة، إلا أن زيادة درجة إشابة القمة يجعل ما تحت الوصلة عند درجة إشابة منخفضة نسبيا فتزداد بذلك رقعة النضوب وتقل معه سعة الوصلة بما يتيح للنبيطة أن تعمل بطريقة أسرع.

وكذلك يمكن تحسين طبقة النضوب باستعمال ثنائى ضوئى $p-i-n$ حيث ترمز (i) إلى منطقة شبه موصل ذاتى، مشابهة بإشابة خفيفة، شكل (٨-١١). فى هذه النبيطة تضمن المناطق p^+ ، n^+ مع وجود الانحياز العكسى، نضوب الرقعة i بشكل دائم، كما أن الانحياز العكسى الذى يظهر عبرها يولد مجالا كهربيا عاليا يحقق سرعة مسح حاملات الشحنة لمنطقة النضوب.

كان ذلك استعراضا لطرق الكشف عن فوتونات تقل أطوال موجاتها عن طول موجة القطع فى شبه موصل السيليكون وإذا رادت أطوال الموجات عن طول موجة القطع، لا يحدث تولد أزواج حاملات الشحنة ويصبح السيليكون عندئذ نافذا لهذه الفوتونات وخاصة إذا أهمل الامتصاص بواسطة الشوائب والعيوب البلورية.

مثال ٨-٤ :

كيف يمكن تصميم كاشف ثنائى ضوئى سريع من السيليكون للكشف عن فوتونات صادرة من ليزر هيليوم - نيون لخلول موجته 632.8 nm وتردده المعدل 6 GHz علما بأن سمك طبقة النضوب الملائمة لهذا التطبيق هو ما يتيح زمن عبور يكافئ نصف التردد المعدل، كما أن الشحنات تتحرك عند تشيع سرعة الانسياب وقدرها 10^7 cm/s.

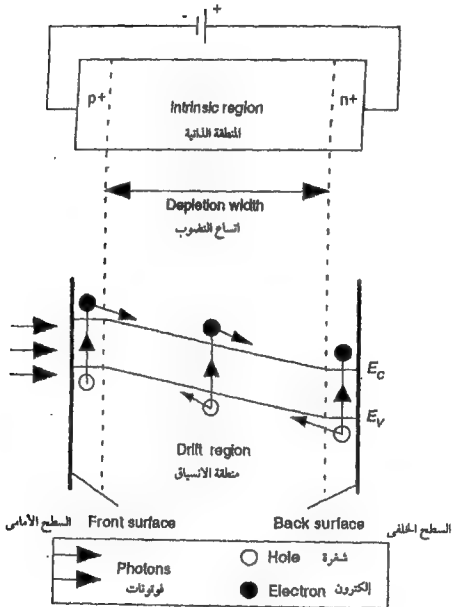
الحل :

$$\begin{aligned} \tau \text{ (زمن العبور)} &= \frac{2}{f} \text{ (مقلوب نصف التردد المعدل)} \\ &= \frac{1}{3 \times 10^6} = 3.33 \times 10^{-6} \text{ s.} \end{aligned}$$

∴ (زمن العبور) $\tau \times$ (سرعة التحرك) $v =$ (سمك طبقة النضوب) W

$$= 10^7 \times 3.33 \times 10^{-6}$$

$$= 33.3 \mu\text{m}.$$



شكل (٨-١١) كاشف ضوئي $p.i.n$

مثال ٨-٥ :

معامل الامتصاص بالقرب من حواف النطاق في كل من Ga As ، Si هو 10^4 cm^{-1} ، 10^3 cm^{-1} على الترتيب . ما هو أقل سمك لعينات من شبه الموصل لتحقيق امتصاص قدره 90% من الضوء الساقط .

الحل :

الطاقة الممتصة في عينة طولها L

$$\frac{I}{I_0} = \frac{I_{\text{abs}}}{I_{\text{inc}}} = 1 - \exp(-\alpha L)$$

$$\therefore L = \frac{1}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{I}{I_0} \right)$$

$$\frac{I}{I_0} = 0.9 \quad \text{بالتعويض عن}$$

$$\therefore L(\text{Ga As}) = \frac{1}{10^4} \ln 0.1 = 2.3 \times 10^{-4} \text{ cm} \\ = 2.3 \mu\text{m}$$

$$L(\text{Si}) = \frac{1}{10^3} \ln 0.1 = 23 \mu\text{m}$$

يوضح هذا المثال أن الكاشف الضوئي المبني على السيليكون يحتاج إلى طبقة امتصاص فعالة سميكة جدا بالمقارنة بالكاشف المبني على Ga As .

مثال ٨-٦ :

في المثال السابق إذا كانت الضيائية الساقطة 10 W/cm^2 عند $\lambda = 0.75 \mu\text{m}$. احسب معدل تولد أزواج الإلكترون والشفرة في شبه موصل Ga As .

الحل :

يحسب معدل تولد أزواج الإلكترون والشفرة من العلاقة :

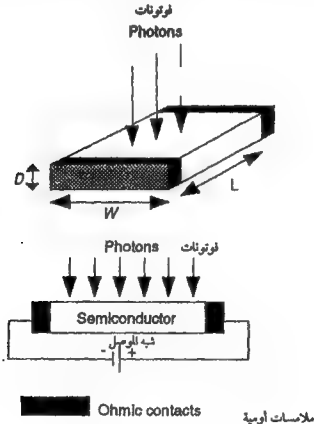
$$G_L = \frac{\alpha P_{\text{op}}}{h \nu} = \frac{(10^3 \text{ cm}^{-1}) (10 \text{ W/cm}^2)}{(1.65) (1.6 \times 10^{-19} \text{ J})} \\ = 2.65 \times 10^{23} \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

(٥-٨) الموصل الضوئي Photo Conductor

تتكون هذه النبيطة من شريحة رقيقة لبؤرة شبه موصل. ينتهى كلا طرفيها بوصلة أومية، وتزداد الموصلية الكهربائية لها عند التأثير عليها بالضوء. لهذه الظاهرة عديد من التطبيقات منها كاميرات التلفزيون وكاشفات الأشعة دون الحمراء وأجهزة قياس شدة الضوء وأجهزة التصوير الضوئي.

يبين شكل (٨-١٢) تخطيطا لخلية كهروضوئية أولية، ويظهر فيها D سمك الخلية كافيا لامتصاص كل الفوتونات الساقطة، بذلك تكون D أكبر قليلا من $\frac{1}{\alpha}$ ، حيث α معامل امتصاص الضوء. وقد تكون مادة كاشف الضوء فى النبيطة من شبه موصل ذاتى أو شبه موصل عرضى. يؤدي ذلك إلى نوعين من آليات التوصيل الضوئى كما يوضحه شكل (٨-١٣)، هما:

(١) التوصيل الضوئى الذاتى، شكل (٨-١٣) وفيه يلزم أن تكون طاقة الفوتون الساقط أكبر من فجوة طاقة شبه الموصل لئى يتولد زوج من



شكل (٨-١٢) الموصل الضوئى

إلكترون وضعة وينحرك هذا الزوج نحو تأثير مجال كهربي إلى الوصلات
الأيونية الطرفية فتولد تيارا كهريا في الدائرة الخارجية.

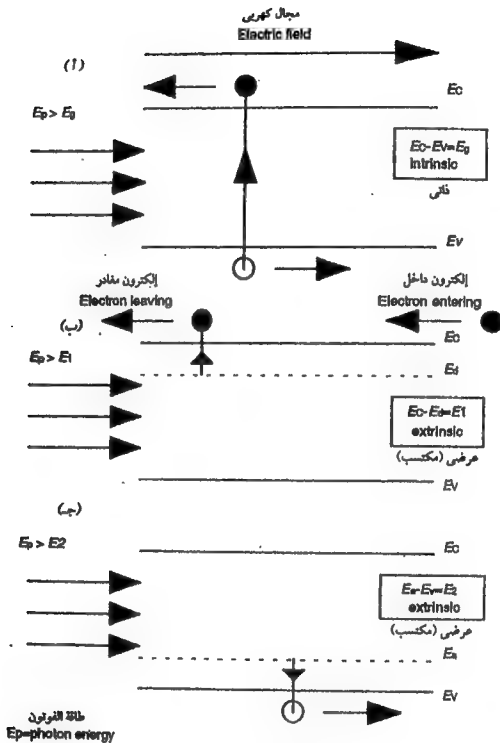
(ب) التوصيل الضوئي (المكتسب) العرضي، شكل (٨-١٣ ب، ج) في هذه
الحالة يتولد التيار الكهربي في الدائرة الخارجية نتيجة لتأين ضوئي عند
مستوى المنح أو مستوى المتقبلات. وقد يحدث أن تكون طاقة الفوتون
الساقت أقل من نصف فجوة الطاقة في شبه الموصل فتستغل طاقة هذا
الفوتون في تأين ذرة شائبة، مانحة كانت أو متقبلة، ومن ثم تولد
إلكترونات وشغرات قابلة للحركة فتسهم بذلك في التيار الكهربي بالدائرة
الخارجية.

لتحليل ما يحدث في حالة التوصيل الضوئي العرضي، نستعرض التجربة التالية
مع الاستعانة بشكل (٨-١٤) عينة التجربة هي قطعة صغيرة من شبه موصل فيها مستوى
منح وحيد، يتم تأين هذا المستوى ضوئيا. ولتبسيط المهمة، نحفظ شبه الموصل عند
درجة حرارة منخفضة للغاية بحيث لا يمر تيار كهربي فيه بتأثير مجال كهربي خارجي
عند إظلام العينة، يعبر عن ذلك بشكل (٨-١٤ أ) حيث يبقى الإلكترون عند مستوى
المنح (ذرة شائبة) ولا يمر تيار لعدم وجود شحنات حرة. إذا سقط فوتون واحد ذو طاقة
كافية لإحداث التأين للذرة مانحة، شكل (٨-١٤ ب) يتحرك الإلكترون الناتج من عملية
التأين مبتعدا في الاتجاه المين نحو الوصلة الأيونية الطرفية. وللإبقاء على التعادل
الكهربي في شبه الموصل، فور أن يغادر هذا الإلكترون الكاشف الضوئي سيدخل
إلكترون آخر من الوصلة الأيونية الأخرى. بذلك نحصل على تيار من إلكترونين مقابل
فوتون واحد، ومن الطبيعي أن تستمر هذه العملية خلال فترة زمنية محددة τ ، تعرف
بزمن بقاء (حياة) حاملة الشحنة، بعدها يتم اصطياذ الإلكترون بواسطة مراكز اصطياذ
تقع عند مستوى المنح، شكل (٧-١٢ ج).

. إذا كان زمن اجتياز الإلكترون للكاشف (الموصل) الضوئي، وهو ما يعرف أيضا
بـ «زمن العبور t »، فإن التكبير أو الكسب A يعطى بالعلاقة :

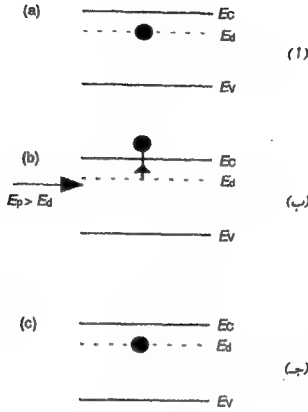
$$A = \frac{\tau}{t} \quad (8-2)$$

تكشف هذه العلاقة أين تكمن المهارة الأساسية عند تصنيع نبطات التوصيل
الضوئي، ففي النبطة السريعة الاستجابة يلزم استخدام مادة تتميز بزمن حياة τ قصير إلا
أن حساسية مثل هذه النبطة تكون ضعيفة. أما في المواد ذات التكبير العالي، تشتد
الحساسية لمستويات الضوء المخافت غير أنها تكون ضعيفة الاستجابة للترددات.



شكل (٨-١٣) موصلات ضوئية ذاتية وعرضية

- (1) طاقة الفوتون E_p أكبر من فجوة الطاقة في شبه موصل ذاتي.
 (ب) طاقة الفوتون E_p أكبر من مستوى المنح في شبه موصل عرضي.
 (ج) طاقة الفوتون E_p أكبر من مستوى الاستقبال في شبه موصل عرضي مكتسب.



شكل (٨-١٤) كسب التوصيل الضوئي

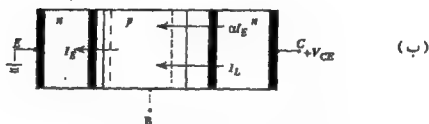
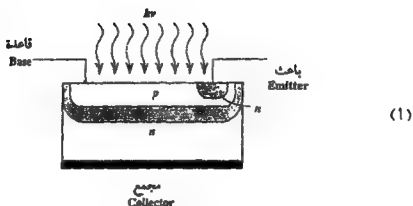
(٨-٦) الترانزستور الضوئي The Phototransistor

الترانزستور الضوئي نيطة ثنائية القطب، تقوم بعمل كاشف ضوئي، إضافة إلى قدرتها على تكبير التيار الكهربى كمضخم ترانزستورى جيد.

يبين شكل (٨-١٥) رسماً تخطيطياً لترانزستور $n-p-n$ ضوئى. عند الإضاءة نجد أن الإلكترونات والشفرات التى تنتج وفى وجود الانحياز العكسى عند وصلة المجمع - قاعدة تُكتسح فى المجال الكهربى مولدة تيار إضاءة I_L ، وينشأ تيار القاعدة من حقن الشفرات إلى داخل القاعدة فتدفع بدورها عملية حقن الإلكترونات من الباعث.

من الشكل يمكن استنتاج أن :

$$I_E = \alpha I_E + I_L \quad (8-3)$$



شكل (1) (10-8) نبيلة الترانزستور الضوئي.
(ب) النبيلة في نمط القاعدة المفتوحة.

حيث α معامل تكبير الترانزستور في نمط القاعدة المشتركة وبما أن الترانزستور يعمل بفتح دائرة القاعدة، فإن $I_C = I_B$ ، وبذلك تصبح العلاقة السابقة :

$$\frac{I_C}{I_L} = \frac{1}{1 - \alpha} \quad (8-4)$$

وحيث إن قيمة α تقترب من الواحد، فإن العلاقة السابقة تظهر تكبيراً عالياً للتيار الكهربى. هذه الخاصية بالإضافة إلى خاصية التشويش المنخفض أعطيا للنبيلة أهمية عظيمة فى استخدامات كثيرة، على الرغم من كبر السعة الكهربائية المصاحبة لوصلة المجمع، قاعدة والتي حدثت من استجاباتها للترددات العالية.

(٧-٨) كسب الموصلية الضوئية Photoconductive Gain

عند سقوط ومضة ضوئية فجائية لتوليد فائض من حاملات الشحنة، شكل (١٢-٨) ومتابعة إعادة التام الحاملات مع الوقت، فإنه يمكن التوصل إلى العلاقة :

$$n = n_0 \exp (-t/\tau) \quad (8-5)$$

حيث تمثل n_0 تركيز الحاملات عند بدء سقوط الضوء $t=0$

، n تركيز الحاملات بعد زمن قدره t

، τ زمن حياة حاملات الشحنة

ويكون معدل الالتئام عندئذ $(1/\tau)$. عند التأثير على الموصل الضوئي بطاقة ضوئية P_{opt} منتظمة وأكبر قليلا من فجوة طاقة الموصل، يتعين عدد الفوتونات التي تصل السطح بانتظام في الثانية بالعلاقة :

$$\text{No. of Photons /s} = \frac{P_{opt}}{h\nu} \quad (8-6)$$

حيث تمثل ν تردد الفوتون. لا تعمل كل هذه الفوتونات على توليد حاملات الشحنة وليتحدد عدد هذه الحاملات بالمعامل η ويطلق عليه «مردود الكم»، وبذلك تصبح عدد الحاملات الحرة في الثانية:

$$\text{No. of Free Carriers /s} = \eta \frac{P_{opt}}{h\nu} \quad (8-7)$$

ويعرف معدل التوليد G بعدد حاملات الشحنة المتولدة في وحدة الزمن وفي وحدة الحجم ويعطى بالعلاقة :

$$G = \eta \left(\frac{P_{opt}}{h\nu} \right) \left(\frac{1}{WLD} \right) \quad (8-8)$$

حيث تمثل (WLD) في شكل (١٢-٨) حجم البنية. ويُعطى معدل إعادة الالتئام بالعلاقة :

$$R = n / \tau \quad (8-9)$$

عند حالة الاستقرار يصبح :

معدل التوليد = معدل إعادة الالتئام

$$\frac{n}{\tau} = \eta \left(\frac{P_{opt}/h\nu}{WLD} \right) \quad (8-10)$$

وحيث إنه يمكن التعبير عن التيار الضوئي I_p للماد بالعلاقة :

$$I_p = E\sigma DW = DWqn v_d \quad (8-11)$$

حيث تمثل E شدة المجال الكهربى المؤثر

، σ الموصلية الكهربائية لشبه الموصل

، v_d سرعة انسياب حامل الشحنة

فإنه بالتعويض عن تركيز الحاملات n من المعادلة (8-10) فى المعادلة (8-11) نحصل على:

$$I_p = q\tau\eta \left(\frac{P_{opt}}{h\nu} \right) \left(\frac{v_d}{L} \right) \quad (8-12)$$

ويعرف التيار الضوئى الأمامى I_{pri} بأنه التيار المار نتيجة سقوط فوتونات فعالة (مع الأخذ فى الاعتبار المردود الكمى) ويعطى بالعلاقة :

$$I_{pri} = q\eta \left(\frac{P_{opt}}{h\nu} \right) \quad (8-13)$$

من هذه العلاقات يمكن حساب قيمة التكبير أو الكسب للموصل الضوئى من خلال النسبة :

$$A = \frac{I_p}{I_{pri}} = \frac{v_d\tau}{L} \quad (8-14)$$

وبالتعويض عن زمن العبور t_{tr} بالعلاقة :

$$t_{tr} = \frac{L}{v_d} \quad (8-15)$$

تصبح علاقة التكبير على الصورة :

$$A = \frac{\tau}{t_{tr}} \quad (8-16)$$

(٨.٨) الخلية الشمسية Solar Cell

رأينا فيما سبق كيفية تولد ضوء أو الكشف عنه باستخدام الوصلة $p-n$. وفيما يلي نستعرض كيف يمكن توليد قدرة كهربية من هذه الوصلة المتواضعة. ففي البند (٨ - ٥) استخدمت الوصلة $p-n$ مع انحنياز عكسي كموصل ضوئي. وفي الحقيقة يمكن الاستغناء عن هذا الانحنياز العكسي، فلو أضيفت الوصلة $p-n$ عند انعدام الانحنياز العكسي تظل آلية فصل الشحنات قائمة، كما هي دون تغير بالقرب من طبقة النضوب وداخلها.

ويمكن ملاحظة الشحنات المتحركة كتيار خارجي للموصل الضوئي، كما يمكن قياس «الجهد الضوئي» الناتج عند طرفي النبيطة. وبين شكل (٨ - ١٦) منحنيات $I-V$ المميزة للوصلة $p-n$ في الموصل الضوئي، عند ثلاثة مستويات إضاءة مختلفة واعتبار الطاقة الضوئية الساقطة أكبر من فجوة الطاقة في شبه الموصل بالنبيطة. ويلاحظ أن الوصلة المضادة تولد فرق جهد ملحوظ عند طرفي النبيطة مع عدم مرور تيار كهربي ويعرف بجهد الدائرة المفتوحة V_{oc} ، كما تعرف هذه الظاهرة بالظاهرة الفوتوفولتية. تحسب قيمة هذا الجهد من معادلة الشانلي المثالي وهي المعادلة (73 - 5):

$$I = I_n \left\{ \exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right\}$$

حيث يستعاض عن V بالقيمة V_{oc} ، وعن I بقيمة التيار الضوئي I_p وتقول العلاقة السابقة إلى:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(1 + \frac{I_p}{I_n} \right) \quad 8-17.$$

يمكن تقدير القيمة القصوى لهذا الجهد إذا وضع في الاعتبار أن جهد الدائرة المفتوحة لا يمكن أن يزيد عن الجهد الداخلي المبيت داخلها V_m في الشانلي وهذا بدوره لا يزيد عن فجوة الطاقة E_G في شبه الموصل. بذلك نحصل على الارتباط التالي:

$$V_{oc} < V_m < \frac{E_G}{q} \quad 8 \quad 18$$

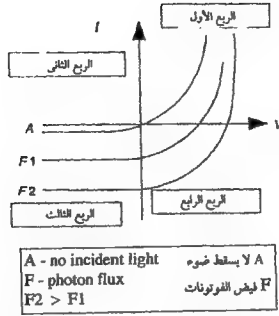
والقيمة النموذجية لجهد الدائرة المفتوحة في الخلية الشمسية السيليكونية أقل من الفولت الواحد. كما أن الخلية الجليدة يمكنها أن تغطي في الدائرة المقصورة تياراً قدره 20 mA أو أكثر لكل سنتيمتر مربع من سطح الخلية، ويجب الحفاظ على هذه القيم إذا أريد الحصول على قدرة نافعة من الخلية الشمسية، وهذا يتطلب أن تُرص خلايا عديدة على التوالي لزيادة الجهد وترص خلايا عديدة على التوازي لدمج التيار، ويؤدي ذلك إلى افتراض مساحات شاسعة بالخلايا الشمسية للوصول إلى قدرة كهربية فعالة. ونجيب الإشارة في هذا المجال إلى «معامل الكفاءة» وتعرفه نختار من شكل (٨ - ١٧) واحداً من منحنيات $I - V$ المميزة عند مستوى إضاءة معين. فيها V_{oc} يمثل جهد الدائرة المفتوحة، I_{sc} تيار الدائرة المقصورة وتحدد أقصى قدرة ممكنة، تبعاً لهذه القيم بمسطيل القدرة العظمي المظلل في الشكل وفيه يمثل I_m قيمة أقصى تيار، V_m قيمة أقصى جهد تتيهما الخلية، فيتحدد معامل الإمتلاء بالعلاقة:

$$\text{معامل الامتلاء} = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} = \text{Fill Factor}$$

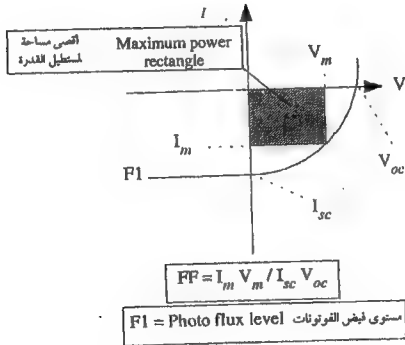
8 - 19

ونمثل هندسياً بالنسبة بين مساحتي مسطيل القدرة القصوى والجزء المحصور بين المنحني المميز $I - V$ للمحاور.

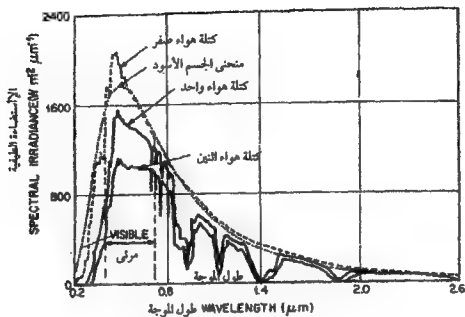
يعتبر تصنيع الخلية الشمسية أمراً بالغ الصعوبة إذا قورن بتصنيع كاشف (موصل) ضوئي. ففي حالة الكاشف الضوئي المتناثر نحتاج فقط إلى فوتون أحادي الموجة للتعرف عليه، فيسهل تصميم الكاشف. أما في حالة الخلية الشمسية فإن ما يسقط عليها من الطيف الشمسي، غير متجانس وتقدر أطوال موجاتها بين $0.3 \mu m$ إلى $1.5 \mu m$ ، انظر شكل (٨ - ١٨)، وهذه القيم لا تناسب الخلايا الشمسية السيليكونية التي تكون غير حساسة لتلك الموجات التي تزيد عن واحد ميكرون والموجات شديدة القصر. وهكذا نجد أن أحد المشاكل للهيمنة هي أننا نحاول الكشف عن حزمة ضوئية عريضة من الطيف باستخدام شبه موصل ذي فجوة طاقة وحيدة. قد تكون من المهارة تصنيع نبيطة تشمل عدداً كبيراً من أشباه موصلات مختلفة لتغطية أكبر قدر من الطيف الكهرومغناطيسي الشمسي - إلا أن هذه الفكرة تخف بها مشاكل صعبة من وجهة نظر المواد. وإذا اخترنا الأمر إلى روج من وصلات $p - n$ بات ضرورياً أن نتواءم ولا اضطررت كفاءة النبيطة.



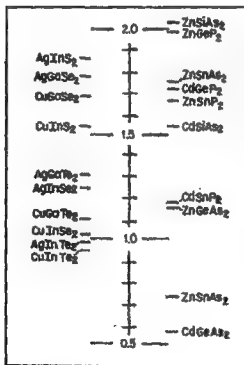
شكل (٨-١٦) منحنيات $I - V$ للميزة لوصلة $p - n$



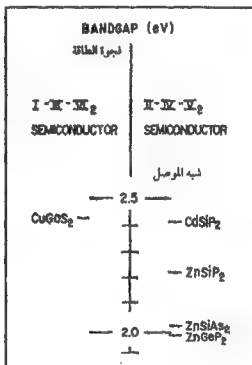
شكل (٨-١٧) مستطيل القدرة القصوى وحساب معامل الكفاءة



شكل (٨-١٨) طيف الإشعاع الشمسي
لحالات مختلفة من وزن الهواء



عمود ٢



عمود ١

جدول (٨-١٣) أشباه موصلات مركبة
للمخلايا الشمسية

وعلى الرغم من هذه الصعاب، أمكن تصنيع خلايا متعددة الوصلات باستخدام أشياء موصلات مركبة بدلا من السيليكون، جدول (٨ - ٣). وتلعب كمية الضوء الساقطة على الخلية الشمسية دورا هاما. فعند استخدام السيليكون يتم أسر الضوء إلى داخل سطح البلورة عن طريق طلاء السطح بمادة مائعة للانعكاس، غير أن هذه العملية تكون فعالة فقط لطول موجى محدد. وكوسيلة لأسر أكبر قدر ممكن من الإشعاع الشمسى الساقط على الخلية، أمكن إعداد سطح منمش بطريقة الحفر الكيميائى لمستويات ذرية معينة فى بلورة السيليكون بهدف تغطية سطح الخلية الشمسية بغمارات هرمية تبعد بعضها عن بعض بإراحات تقل عن $100 \mu m$ ، ويسمح ذلك بتوجيه أكبر قدر ممكن من الضوء إلى داخل الخلية. ويتضح كل ذلك فى الأشكال (٨ - ١٩). وبالنسبة لتثبيت الاقطاب التى تحمل التيار الضوئى فى الخلية، ليست هناك مشكلة فى تثبيت القطب الخلفى على السطح غير المعرض للضوء. ولتجنب حجب الضوء عن السطح الامامى المعرض للضوء، صمم القطب الامامى على هيئة أصابع فلزية رقيقة، تثبت عبر السطح الامامى وهذه الأصابع تتصل بقضيب سيار سميك كموصل جيد للكهرية عند طرف الخلية، ويتضح ذلك فى شكل (٨ - ٢٠).

مثال (٨ - ٦):

وصلة $p-n$ بيليكونية طويلة انحيارها العكسى $2V$ وفى نبيلة صفاتها

كالتالى:

$A = 10^4$	μm^2	مساحة مقطع الثانى
$N_A = 2 \times 10^{16}$	cm^{-3}	إشابة الناحية p
$N_D = 10^{16}$	cm^{-3}	إشابة الناحية n
$D_n = 20$	cm^2/s	معامل انتشار الإلكترون
$D_p = 12$	cm^2/s	معامل انتشار الشفرة
$\tau_n = 10^{-8}$	s	زمن حياة الحاملات الاقلية من الإلكترونات
$\tau_p = 10^{-8}$	s	زمن حياة الحاملات الاغلبية من الشفرات
$G_i = 10^{22}$	$cm^{-3} s^{-1}$	معدل إعادة الالتئام من الإلكترونات والشفرات

احسب التيار الضوئى.

الحل:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = \left\{ (20)(10)^{-8} \right\}^{1/2} \text{ طول انتشار الإلكترون}$$

$$= 4.5 \text{ } \mu m$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = \left\{ (12)(10)^{-8} \right\}^{1/2} \text{ طول انتشار الشفرة}$$

$$= 3.46 \text{ } \mu m$$

ولحساب سمك طبقة النضوب نقوم بحساب الجهد المي:

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

$$= 0.026 \ln \left(\frac{(2 \times 10^{16}) \times (10)^{16}}{(1.5 \times 10^{10})^2} \right) = 0.715 \text{ V.}$$

وتصبح سمك طبقة النضوب:

$$W = \left\{ \frac{2\epsilon_{si}}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \left(V_{bi} + V_R \right) \right\}^{1/2}$$

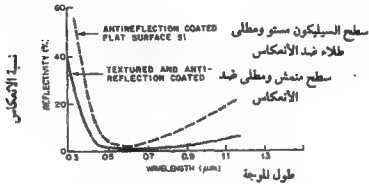
$$W = \left\{ \frac{2 (11.9) (8.85 \times 10^{-14})}{1.6 \times 10^{-19}} \left(\frac{12 \times 10^{16} + 1.0 \times 10^{16}}{(2 \times 10^{16}) (1.0 \times 10^{16})} \right) (0.715 + 2) \right\}^{1/2}$$

$$= 0.73 \text{ } \mu m.$$

ويكون التيار الضوئي:

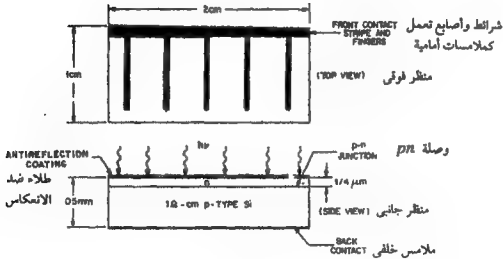
$$I_L = qA G_L (W + L_n + L_p)$$

$$= 0.137 \text{ mA}$$



شكل (٨-١٩)

(أ) سطح خلية شمسية سيليكونية مغطاة بمعالجات هرمية.
(ب) رسم بياني يبين تأثير نوع السطح وطلاءه بمادة مسامية
للانعكاس على نسبة الانعكاس.



شكل (٨-٢٠)

السطح العلوي والجانبين خلية شمسية سيليكونية

مثال (٨ - ٧):

خلية شمسية سيليكونية عند 300 K فيها:

$A = 1$	cm^2	المساحة p
$N_A = 5 \times 10^{17}$	cm^{-3}	إشابة مستوى المتقبلات
$N_D = 10^{16}$	cm^{-3}	إشابة مستوى المانحات
$D_n = 20$	cm^2/s	معامل انتشار الإلكترون
$D_p = 10$	cm^2/s	معامل انتشار الشفرة
$\tau_n = 3 \times 10^{-7}$	s	زمن إعادة الإلتئام للإلكترونات
$\tau_p = 10^{-7}$	s	زمن إعادة الإلتئام للشفرة
$I_L = 25$	mA	التيار الضوئي

احسب جهد الدائرة المفتوحة للخلية الشمسية:

الحل:

أولاً: يجب حساب تيار التشبع I_o من العلاقة:

$$I_o = A \left\{ \frac{q D_n n}{L_n} + \frac{q D_p p}{L_p} \right\} = A q n^2 i \left\{ \frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right\}$$

ولكن:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = \left\{ (20)(3 \times 10^{-7}) \right\}^{1/2} = 24.5 \mu\text{m}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = \left\{ (10)(10^{-7}) \right\}^{1/2} = 10 \mu\text{m}$$

بالتمويض في علاقة تيار التشبع نحصل على $I_o = 3.66 \times 10^{-11} \text{ A}$. فيكون

جهد الدائرة المفتوحة V_{oc} هو:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(1 + \frac{I_L}{I_o} \right)$$

$$= (0.026) \ln \left(1 + \frac{25 \times 10^{-3}}{3.66 \times 10^{-11}} \right) = 0.53 \text{ V.}$$

(٩-٨) السيليكون الأمورفي والخلايا الشمسية

Amorphous Silicon and Solar Cells

لا شك أن عنصر السيليكون قد لعب ولا يزال يلعب دورا هاما في التقنيات الإلكترونية التي تقوم على أشباه الموصلات، والحصول على هذا العنصر في صورته البلورية ليس بالأمر الهين تكنولوجيا واقتصاديا. وقد كان عام ١٩٥٤ شاهدا على صناعة أول خلية شمسية ذات كفاءة تحويل للطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية لا تزيد عن ٦٪ وكانت تلك الخلية من وصلة pn مأخوذة من بلورة سيليكون أحادية. وقد ساعد ارتياد الفضاء على ازدهار بحوث الطاقة الشمسية للحصول على مصادر للطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل الأجهزة على سفن الفضاء، فضلا عما تتبوأ به الخلايا الشمسية من مكانة آخذة في الازدياد والأهمية في التطبيقات المختلفة على سطح الأرض.

وقد توالى الدراسات والبحوث بما رفع كفاءة التحويل للبلورات السيليكون إلى ١٩٪. بينما وصلت الكفاءة إلى ٢٣٪ في الخلايا المكونة من مادة زرنخيد الجاليوم Ga As ثم اتجهت الدراسات إلى خفض تكلفة الحصول على خلايا شمسية باستخدام أشباه الموصلات الأمورفية. وتحقق ذلك لأول مرة عام ١٩٧٤، حيث تم ترسيب أغشية أمورفية شبه موصلة من مادة السيليكون الأمورفي المهدرج ($a-Si:H$) واستخدم لهذا الغرض تفريغ توهجي خلال مادة السايلان (SiH_4) المتوهجة. وقد وجد أن تلك الأغشية مكونة من شبكة «رجاجية» من السيليكون والهيدروجين وتعتمد مقاومتها النوعية على درجة حرارة الطبقة السفلية الحاملة للغشاء (الركيزة). كما تحتوى الأغشية على كميات محسوسة من الهيدروجين المترابط، أى الذى يعادل الروابط الكيميائية التى قد تصبح فى ظروف أخرى روابط مدلاة أو متأرجحة وهكذا تقل نسبيا كثافة الحالات فى فجوة الطاقة.

ويعتمد تركيز الهيدروجين فى ($a-Si:H$) على ظروف الترسيب، كدرجة حرارة الركيزة ونوع التفريغ والقدرة المستهلكة فى عملية التفريغ وضغط غاز SiH_4 ومعدل انسيابه. ويبين شكل (٨ - ٢١) مقارنة لتغير قيمة معامل الامتصاص مع الطول الموجي لكل من بلورة سيليكون أحادية والسيليكون الأمورفي

(٨-١٠) هياكل الخلايا الشمسية

The structure of Solar Cell

تشمل هذه الهياكل خلايا حاجز شوتكى ووصلات $p-n$ ووصلات $p-i-n$ والوصلات غير المتجانسة.

٨-١٠-١ خلايا حاجز شوتكى،

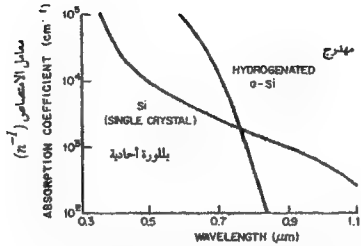
تصنع أبسط هذه الخلايا بترسيب السيليكون الامورفى المهدرج وغير المشاب على طبقات حاملة من فلزات كالحديد Fe والموليدنم Mo، ثم يتم بعد ذلك تبخير غشاء رقيق من فلز ذى دالة شغل مرتفعة كالبلاتين بسبك يصل إلى نحو 50 \AA فوق طبقة السيليكون. وقد وجد أن دمج طبقة رقيقة مشابهة بالفوسفور بسبك يقرب من $0.1 \mu\text{m}$ فوق الطبقة التحتية مباشرة يحسن من عمل الخلايا، وتصنع هذه الطبقة المشابة عادة من تفرغ توهجى فى Si H_4 يحتوى على ما يقرب من ١٪ من pH_3 . ويرمز لخلايا حاجز شوتكى بالاحرف MIS حيث يرمز حرف M إلى الفلز، I إلى العازل، S إلى شبه الموصل. وهذه الخلية بدون طلاء مضاد للانعكاس لا تنفذ سوى ٤٠٪ إلى ٥٠٪ من الضوء الساقط عليها ويزداد إلى ٨٠٪ أو ٩٠٪ بوضع طبقة مضادة للانعكاس بسبك 450 \AA تقريبا من مادة أكسيد الزركونيوم Zr O_2 أو أكسيد التيتانيوم Ti O_2 أو نيتريد السيليكون $\text{Si}_3 \text{N}_4$. شكل (٨ - ٢٢٢).

٨-١٠-٢ وصلات pn ووصلات $p-i-n$

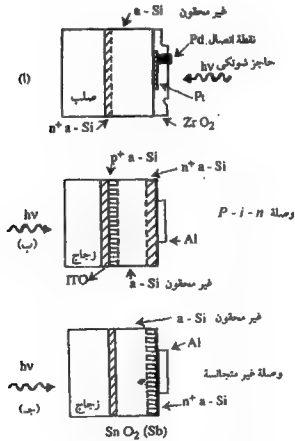
تصنع خلايا وصلات pn ترسيب طبقة من a-Si:H مشابهة بالفوسفور فوق طبقة أخرى مشابة بالبورون أو العكس. أما خلايا وصلات $p-i-n$ فيستخدم فيها طبقة غير مشابة ذات سمك يصل إلى $1 \mu\text{m}$ تقريبا وطبقتان رقيقتان هما p^+ ، n^+ ملاصقتان للقطبين الامامى والخلفى على الترتيب. ويتراوح سمك هاتين الطبقتين بين 1000 \AA إلى 300 \AA وتجهزان داخل تفرغ توهجى لمادة Si H_4 يحتوى على نحو ١ ٪ من B_2H_6 أو pH_3 (شكل ٨ - ٢٢٢ ب).

٨-١٠-٣ خلايا الوصلات غير المتجانسة

صنعت أولى هذه الخلايا بترسيب a-Si:H غير المشاب فوق طبقات رجاجية حاملة ومغطاة إما بطبقة من أكسيد الأندريوم والقصدير ITO أو باكسيد القصدير Sn O_2 المشاب بالانتيمون Sb. ويتم ترسيب طبقة $n+a-Sn$ فوق الطبقة غير المشابة لتوفير اتصال كهربى أومى لقطب الألومنيوم شكل (٨ - ٢٢ ج).



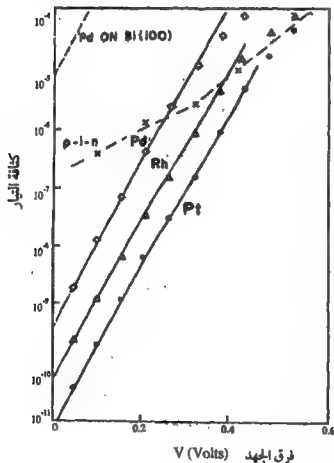
شكل (٢١-أ) تغير معامل الامتصاص مع طول الموجة في بلورة سيليكون أحادية ، والسيليكون الأمورفي a-Si



شكل (٢٢-أ) هياكل الخلايا الشمسية

ويخلص شكل (٨ - ٢٣) المنحنيات $I - V$ المميزة عند الإظلام لحالات حواجز شوتكي للفلزات Pd , Rh , Pt المترسبة على $a - Si: H$ وكذا في حالات Pd مع السيليكون البلوري ومع وصلة $p - i - n$.

تتأثر الخواص الفوتوفولتية للخلايا الشمسية المصنعة من السيليكون الأمورفي المهدرج بدرجة حرارة الطبقة التحتية (الركيزة) فإذا كانت عند أقل من 200° مئوية أثناء عملية الترسيب، فإن الخواص الفوتوفولتية تسوء بشكل حاد نظرا لزيادة كثافة العيوب التركيبية وكذلك الحال إذا ارتفعت درجة حرارة الركيزة فوق 400° مئوية أثناء التجهيز، وتصبح العيوب عبارة عن روابط كيميائية متأرجحة، تنشأ عن انتشار ذرات الهيدروجين وخروجها من الغشاء، وهكذا نجد أن الخلايا ذات الكفاءة المثلى عند استعمال $a - Si: H$ هي تلك التي تجهز عند درجات حرارة للركيزة تقع بين 200° ، 400° درجة مئوية. والخلاصة أن الخلايا الشمسية المجهزة من هذه المواد تعتمد على ركائز من رجاج أو صلب يجعل إنتاجها اقتصاديا للغاية، مما يشر بطاقة نظيفة ورخيصة ومستدامة من مصدر دائم هو الشمس.



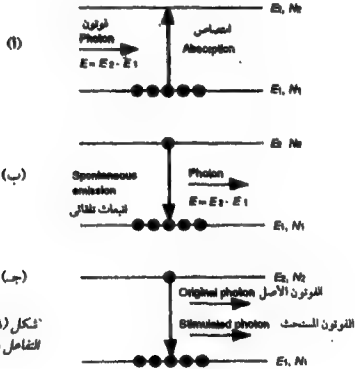
شكل (٨ - ٢٣): المنحنيات المميزة للتيار مع فرق الجهد لحواجز شوتكي (في الظلام) المكونة من Pd و Rh و Pt المترسبة على $a - Si: H$ وكذا بيانات لحواجز شوتكي للبلاديوم Pd على السيليكون البلوري ووصلة $a - Si: H$ في $p - i - n$.

(٨.١١) أشباه الموصلات والليزر

The Semiconductors Laser

أصبح الليزر بشكل عام وليزر أشباه الموصلات بشكل خاص مألوفاً بين الناس في المجتمعات المتقدمة. فإذ توليد الليزر من شبه الموصل خرجت من معامل الأبحاث إلى حيث التطبيقات العامة في سنوات قليلة. وأخذت هذه النية طريقها إلى مسجل الأقراص المدمجة وفي طابعات الكمبيوتر وأنظمة الاتصال البصرية وداخل قاعات الدروس في صورة مؤشر يستخدمه المحاضر.

ولكن ما هو الليزر؟ والإجابة على هذا السؤال، نحتاج في مجلدات خاصة بهذا الموضوع إلا أننا نعرض لها في هذا المجال بصورة مبسطة وبالقدر الذي يتيح لنا استكمال موضوع الكتاب. وكلمة الليزر من مرادفها الإنجليزي LASER اشتقت من: "Light Amplification by Stimulated Emission Radiation" وتعني «تضخيم الضوء بأنبعاث أشعة ضوئية مستحثة»، وذلك في ذرة ما. وفي شكل (٨ - ٢٤) تمثل



شكل (٨ - ٢٤) العمليات البصرية وآليات التفاعل بين فوتون ومستويات ذرة مستقرة

حالات مختلفة لآليات تفاعل فوتون ضوء مع مستويات ذرة مستثارة، كما تخيلها أينشتين. تمثل E_1 حافة نطاق التكافؤ، E_2 حافة نطاق التوصيل في شبه موصل ذات فجوة طاقة مباشرة وهي الحالة التي سوف نتناولها في هذا الفصل.

من المعروف في الذرة المستثارة أنه إذا هبط الإلكترون من مستوى الطاقة E_2 إلى المستوى E_1 ينبعث فوتون ضوء. والصور المختلفة للعمليات الضوئية يمكن تلخيصها بالاستعانة بالأشكال التالية:

١ - الشكل (٨ - ٢٤) يمثل امتصاص فوتون ذي طاقة $E_2 - E_1 = h\nu_{21}$ ليحفز إلكترون ما في المستوى E_1 ليقفز إلى المستوى E_2 .

٢ - شكل (٨ - ٢٤ ب)، سقوط هذا الإلكترون من المستوى E_2 عائداً إلى مستواه E_1 يتسبب في انبعاث ثلثائي لفوتون ذي طاقة $E_2 - E_1 = h\nu_{21}$.

٣ - شكل (٨ - ٢٤ ج)، يتولد فوتون ذو طاقة $(E_2 - E_1)$ في عملية انبعاث ثلثائي ويتقدم ليحفز إلكترون في المستوى E_2 ونتيجة لتماثل طاقة الفوتون «المثير» مع فرق مستوى الطاقة $(E_2 - E_1)$ فإنه يحفز هذا الإلكترون ليسقط إلى مستواه الأرضي E_1 مخلفاً فوتوناً مستحثاً دون حدوث امتصاص للفوتون المثير. فيصبح هناك فوتونان لهما نفس الطاقة ومن ثم نفس التردد والطول الموجي خلال عملية تعرف بالتضخيم الفوتوني التي هي أساس تولد الليزر. كما أن الفوتونان يشتركان أيضاً في الاستقطاب والطور والاتجاه.

ونجد في شكل (٨ - ٢٥) وفرة كبيرة من الإلكترونات في المستوى E_2 كما هو في المستوى E_1 فيما يسمى بالإسكان العكسي المقلوب. إذا صادفت هذه الحالة إلكترونات أخرى، يحدث انهيار إلكتروني من المستوى E_2 إلى المستوى E_1 بواسطة الانبعاث المستثار، ويكون مصحوباً بانبعاث عدد وفير من الفوتونات المتطابقة (أي لها نفس الطور).

وتتطلب عملية تضخيم الضوء، شكل (٨ - ٢٥ ب) أن تغطي عملية الانبعاث المستحث (المستثار) للفوتونات على عمليات الامتصاص. وهذا لا يمكن تحقيقه إلا في حالة التسيكين العكسي المشار إليها. وهي بدورها حالة غير طبيعية ولا تحدث تحت ظروف التوازن الحراري إلا إذا كانت منظومة الدورات المستخدمة ذات ثلاثة مستويات للطاقة بدلا من مستويين فقط. فإذا كانت N_1 تمثل كثافة إسكان الشحنة في المستوى E_1

N_2 تمثلها فى المستوى E_2 ، شكل (٨ - ١٢٦) فإن عملية تضخيم الضوء تعتمد على فرق كثافتى إسكان الشحنة $(N_2 - N_1)$. وفى حالة الاتزان الحرارى عند درجة حرارة TK نجد أن

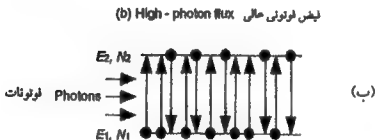
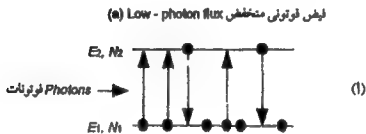
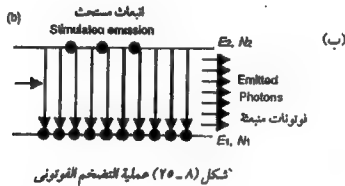
$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\exp - \frac{E_2 - E_1}{kT} \right) \quad 8 - 20$$

تخبرنا هذه العلاقة أنه فى حالة الاتزان الحرارى تهبط الكثافة العددية للإلكترونات عند مستوى الطاقة الأعلى بصورة أسية مع زيادة الفارق بين مستويى الطاقة، إضافة إلى وجود عدد كبير من الإلكترونات عند مستوى الطاقة الأقل وهذا أمر غير مرغوب فيه إذا كان الهدف هو تفوق الإشعاع المستحث. وفى حالة الاتزان الحرارى تعمل المنظومة على امتصاص الفوتونات فقط شكل (٨ - ٢٦ب).

عند التحول من حالة الاتزان الحرارى إلى حالة الإسكان العكسى تمر المنظومة بحالة حرجة يتساوى فيها N_2, N_1 عندها يمكن دفع المنظومة إلى أن تكون منظومة ماصة أو منظومة ذات إسكان عكسى، تؤدي إلى انبعاث مستحث فتصبح مصدراً لليزر.

(٨-١٢) تهيئة الإسكان العكسى Population Inversion

لإعداد حالة الإسكان العكسى فى شبه موصل يؤخذ فى الاعتبار منظومة ثلاثية من مستويات الطاقة، شكل (٨ - ٧) وتوجد بعض الشروط العامة لإتمام عملية التليزر باستخدام الإسكان العكسى. أولها أن المستوى الثانى ويسمى مستوى الضخ هو عبارة عن حزمة من مستويات الطاقة لها اتساع كافى لكى تتيح لمصدر ضوئى تقليدى (والذى يصدر ضوءاً واسع الطيف نسبياً) مثل أنابيب التفريغ الغازى أن ينقل عدداً وفيراً من الإلكترونات من المستوى (١) لحزمة الضخ (٢). تهبط هذه الإلكترونات بمعدل سريع للمستوى الثالث الذى يتميز بأنه حالة كمية (كوانتية) شبه مستقرة (Metastable). وبذلك يتراكم فى المستوى (٣) عدداً وفيراً من الإلكترونات أكبر بكثير من العدد المتاح عند غياب عملية الضخ إلى المستوى (٢). ويطلق على المستوى (٣) تسمية مستوى الإسكان العكسى لوجود هذا العدد الوفير من الإلكترونات أثناء وجود عملية الضخ من المستوى الأرضى للمستوى (٢). الشرط الأخير هو أن تتمكن إلكترونات المستوى (٣) من القفز إلى المستوى الأرضى عبر عملية انبعاث فوتونى. تخرج الفوتونات المنبعثة

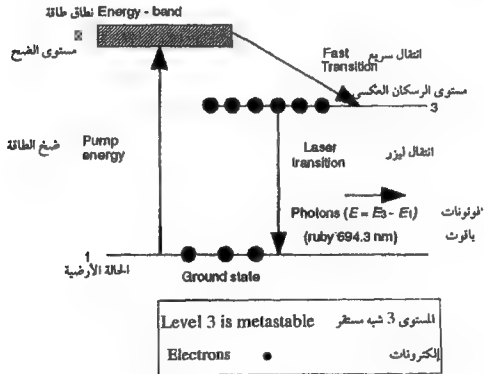


Electrons • إلكترونات

شكل (٨-٢٦) محاولة توليد إسكان عكسي

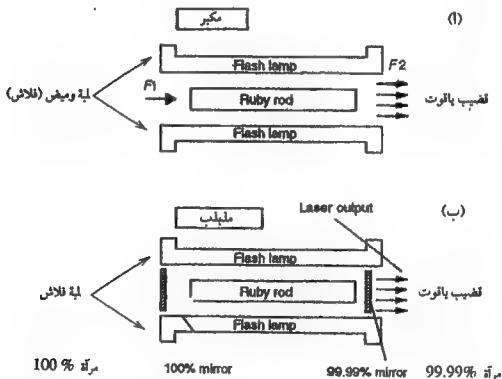
مزيدا من الإلكترونات على الهبوط من المستوى (3) إلى المستوى الأرضي والتي تطلق بدورها مزيدا من الفوتونات المحرصة وبذا يحدث انهيار فوتوني منبعث بشكل ضوء ليزر من فوتونات لها طاقة تساوى الفرق بين طاقتي المستوى (3) والمستوى الأرضي أى $(E_3 - E_1)$.

ولعبت الطبيعة دورها بإيجاد هذه المنظومة فى الياقوت وهو يتكون من أكسيد الألومنيوم مضافا إليه 0.05% بالورن أكسيد كروم، فكان الليزر الياقوتي وهو أول ليزر أنتجه نيودرو مايمان عام ١٩٦٠ مستخدما بلورة ياقوت أحادية على شكل أسطوانة طولها بضعة سنتيمترات. تصقل نهايتيه البلورة، بحيث تكونان متوازيين ومستويتين تماما. فإذا تم طلاؤهما بطبقة مانعة لانعكاس الطول الموجي 694.3 nm المصاحب للفوتون ذي الطاقة $(E_3 - E_1)$ ، ثم ضخّت البلورة إلى مستوى الإسكان العكسي باستخدام مصدر ضوئي شديد كمصباح الزينون وسمح بمرور نبضة ضوئية سريعة، طولها الموجي بمرور 694.3 nm خلال الأسطوانة، يحدث تضخيم لهذه النبضة لما تسببه من انبعاث ذاتي (تلقائي) من مستوى الطاقة الأعلى E_3 . ويتولد فيض قدره F_2 من الفوتونات يزيد كثيرا



شكل (٨-٢٧) منظومة ليزر المستويات الثلاثة

عن الفيض الساقط F_1 وبذلك نحصل على مكبر ليزري بسيط، شكل (٨ - ٢٨). أما إذا فضضت إحدى النهايتين تفضيضا كاملا بينما تفضض الأخرى جزئيا، بحيث تسمح بانعكاس بعض الضوء ونفاذ البعض الآخر، ثم يضخ ضوء من المصدر، فإن الانبعاث الملحظي للفوتونات يسبب إثارة ذرات الكروم وحدث التوزيع السكاني العكسي. وعندما نهبط الذرات المشتارة إلى المستوى الأرضي ينبعث ضوء أحمر أحادي اللون طوله الموجي 634.8 nm، ويتألق به الياقوت. ويمكن لهذه الفوتونات المنبعثة تلقائيا أن تبدأ عملية الحث وتولد الانعكاسات المتتالية بين نهايتي بلورة الياقوت تفاعلا متسلسلا يسفر عن تضخيم الضوء للدرجة تجعله ينطلق على شكل نبضات ضوئية شديدة، شكل (٨ - ٢٨ ب). ولقد أدخلت بعد ذلك تعديلات على الليزر الياقوتي رادت من قدرة النبضات التي يصدرها، حيث بلغت أكثر من 25 TW.



شكل (٨ - ٢٨) مكبر ليزري (ب) مضخ ليزري

(١٢.٨) ليزر الوصلة المتجانسة

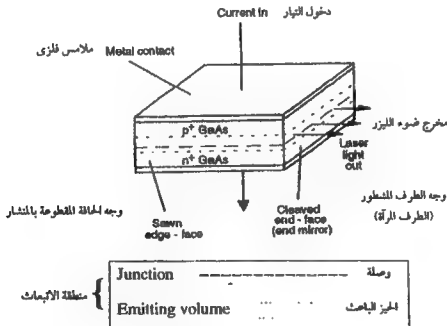
The Homojunction Laser

يبين شكل (٨ - ٢٩) أبسط تركيب لنبيطة ليزر حَقْن شبه الموصل وتعرف بليزر الوصلة المتجانسة، وهو يعمل عن طريق حقن حاملات الشحنة عبر الوصلة بدلا من عملية الضخ الضوئى. وتركيب النبيطة يزيد قليلا عن تركيب نبيطة الثنائى الباعث للضوء غير أنها تنتهى عند طرفيها بزوج من المرايا. هذه النهايات العاكسة تنشأ بشق (فلق) بلورة شبه موصل عند مستوياتها البلورية. وتحدد الانعكاسية من هذه السطوح وفقا لقانون الانعكاس لفيرتل:

$$r = \left(\frac{\mu_0 - \mu}{\mu_0 + \mu} \right)^{1/2} \quad 8-21$$

حيث تمثل μ_0 معامل انكسار الهواء، μ معامل انكسار مادة شبه الموصل. ونتيجة لتربيع القوس يتساوى الأمر إن كان الضوء داخلا أم خارجا من شبه الموصل.

يمثل مركب زرنيخيد الجاليوم Ga As نموذجا لهذه النبيطة. فهو ليزر شبه موصل شائع معامل انكساره 3.66 يمكن تصنيع مرآة تعكس بنسبة 33% من الإشعاع الساقط من فجوة الطاقة بعملية انفلاق بسيطة. وهذه النسبة المنعكسة للفوتونات تقل كثيرا عما



شكل (٨ - ٢٩) نبيطة ليزر الوصلة المتجانسة

هى فى حالة مرابيا ليزر اللياقوت، إلا أن هذا الأمر ليس مهما لأن معامل التضخيم (التضخيم فى وحدة الطول) يزيد كثيرا فى ليزر أشباه الموصلات.

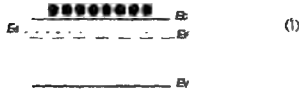
يحدث انبعاث الضوء من النيطة المثلة فى شكل (٨ - ٢٩) بمثل ما يحدث فى حالة النيطة LED، فعند التأثير على الوصلة بانحياز أمامى تم إعادة الالتئام بين الإلكترونات والشغرات ويتولد بذلك فوتونات طاقاتها تساوى فجوة الطاقة. ويحدث الانبعاث التلقائى عند منطقة الوصلة. غير أن الأمر يحتاج إلى أكثر من ذلك للحصول على انبعاث حثى. وهنا لا يستحب الحديث عن الإسكان العكسى، لأن الأمر يختلف هنا عما كان عليه من قبل حين كانت الإلكترونات تلعب وحدها فى الساحة. ويتطلب الأمر عندئذ وجود وفرة كبيرة من الإلكترونات فى نطاق التوصيل وفى نفس الوقت وجود وفرة كبيرة من الشغرات فى نطاق التكافز، شكل (٨ - ٣٠) ويتيح ذلك أعدادا وافرة من إعادة الالتئام بين الإلكترونات والشغرات عبر فجوة الطاقة مولدة إشعاعا بقدر هذه الطاقة $(E_c - E_v)$.

والطريقة المتبعة للحصول على كميات كبيرة من الإلكترونات وأخرى من الشغرات فى وقت واحد فى نفس المادة هى أن نبدأ بشبه موصل من النوع p يكون مشابهاً بدرجة تركيز عالية ثم نحقق داخلها كميات كبيرة من الإلكترونات باستخدام الوصلة n p (تماما كما فى حالة النيطة LED) أو أن نبدأ بشبه موصل من النوع n مشابهاً بدرجة تركيز عالية ثم نحقق داخلها كميات كبيرة من الشغرات. والفرق الفيزيائى بين نيطة الليزر ونيطة LED أن الأولى تتميز بكثافة عالية من اردواج الإلكترونات والشغرات إضافة إلى مستويات حقن أكثر بكثير عما تتميز به النيطة الثانية.

ويعمل ليزر الوصلة المتجانسة Ga As كشبه موصل باعث للفوتونات فى المنطقة تحت الحمراء وتصل فجوة الطاقة لهذه المادة 1.43 eV تناظر انبعاثا فوتونيا عند $0.87 \mu m$ ، يقع فى المنطقة المشار إليها من الطيف، ويكون انبعاث الضوء عند منطقة الوصلة غير متماثل لاختلاف طول انتشار حاملات الاقلية من الإلكترونات فى المنطقة p عنه فى المنطقة n فى Ga As؛ وينبعث الضوء من إعادة التئام هذه الحاملات مع حاملات الأغلبية، ويتحقق عدم تماثل الانبعاث حول الوصلة فى شكل (٨ - ٢٨)، حيث نجد الحدود المنقطة تمثل حجم الانبعاث. ولأن الإلكترونات تنتشر إلى مدى أكبر داخل المنطقة p^+ فى شبه موصل Ga As قبل إعادة الالتئام، فإن حجم الفوتونات المنبعثة ناحية p من الوصلة تكون أكبر من الحجم المنبعث ناحية n .

وبين شكل (٨ - ٣١) قدرة خرج ثنائى الليزر كدالة لتيار الدخل المحفز وحين تصل قيمة هذا التيار قرب تيار العتبة، حيث توشك عملية التليزر أن تبدأ، تنقلب عملية

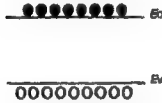
وفرة من الإلكترونات Lots of electrons



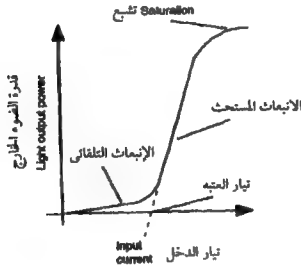
وفرة من الشفرات Lots of holes



وفرة من الإلكترونات والشفرات Lots of electrons and holes



شكل (٨ - ٣٠) إسكان حاملات الشحنة في شبه الموصل



شكل (٨ - ٣١) منحنى يميز مثالي لنبيلة ليزر شبه موصل

الانبعاث التلقائي في خرج الضوء، فيعمل ثنائي الليزر تحت هذه الحالة كبنية LED بسيطة تبعث أمواج غير متطابقة. ومع تخطي قيمة العتبة يبدأ تفوق الانبعاث الحثي وتحدث زيادة سريعة في قدرة خرج الضوء إثر زيادة التيار المحفز، وتستمر هذه الزيادة حتى حدوث عملية التشبع.

من جهة أخرى، هناك عدد من المشاكل التي ترتبط بليزر الوصلة المتجانسة. فالبنية تحتاج إلى تيار كهربائي عال لتحفيز عملية التليزر، تبلغ قيمته $5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ وهذا ناتج جزئياً من ظاهرة انتشار الحاملات، بعيداً عن منطقة الوصلة دون أي عائق بسبب عدم تقييدها في حيز ضيق. كما أن معاملات انكسار الضوء لمادتي طرفي الوصلة واحدة لكونهما نفس المادة ولكن بدرجات إشابة مختلفة، ويعني ذلك صعوبة في تقييد الفوتونات في حيز محدد وتلك مشكلة أخرى. وللحصول على ليزر كفء يحتاج الأمر إلى تيار تحفيز صغير يولد خرج قدرة عال. وهذا بدوره يحتاج إلى:

(أ) تقييد حاملات الشحنة من الإلكترونات والشفرات في حيز ضيق لزيادة احتمال عمليات إعادة الالتئام لتوليد الإشعاع.

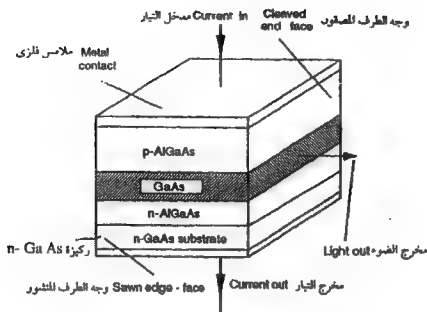
(ب) تقييد الفوتونات في حيز ضيق لزيادة الانبعاث الحثي اللازم لعملية التليزر. وقد أمكن تحقيق هذين العاملين في بنية ليزر الوصلة غير المتجانسة.

(١٤.٨) ليزر الوصلة غير المتجانسة المزدوجة

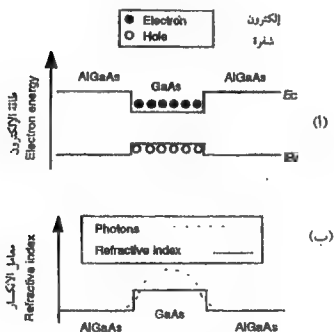
The Double - Heterojunction Laser Diode

يبين شكل (٨ - ٣٢) تخطيطاً لبنية ثنائي ليزر الوصلة غير المتجانسة المزدوجة ويرمز لها بالرمز *DHLD*. تتكون من طبقة فعالة لشبه موصل Ga As بين طبقتين من Al Ga As، العليا من نوع *p* والسفلى من نوع *n* من شبه الموصل. ونتيجة لاختلاف المواد على جانبي الوصلة كانت الوصلة غير متجانسة.

ونظراً لكبر فجوة الطاقة في Al Ga As عنها في Ga As انحصرت حاملات الشحنة كما يوضحه شكل (٨ - ٣٣). وعلى الرغم من اختلاف حجم حافتي عدم الاتصال في نطاقى التكافؤ والتوصيل والتان تؤديان إلى حصر حاملات الشحنة كما يوضحه الشكل إلا أن هذا الحجم كاف لحصر الحاملات بقدر فعال ومؤثر. ويتحقق حصر الفوتونات نتيجة لتفوق معامل الانكسار μ لمادة Ga As على معامل الانكسار μ_2 لمادة Al Ga As. بذلك تصبح الطبقة الفعالة Ga As محصورة بين سطحين مغلفين للفوتونات إذا ما سقطت على السطح بزاوية أكبر من الزاوية الحرجة والتي تقع في



شكل (٨-٣٢) ثنائي ليزر الوصلة غير المتجانسة



شكل (٨-٣٣) حصر حاملات الشحنة والفوتونات لرابع ركيزةاتها

الوسط μ_1 أى فى طبقة Ga As الفعالة، شكل (٨ - ٣٣) يقدو عندئذ مثل لوحة دليل موجى تحصر بداخلها الفوتونات.

للوصول إلى كفاءة عالية للوصلة غير المتجانسة يلزم توافق شبيكى مادتي الطبقة الفعالة والطبقة الملاصقة لها كما هو الحال بين مادتي Al Ga As/ Ga As وكذلك فى مادتي Ga In AsP/ In P اللاتى تستخدم فى توليد ليزر الموجات الطويلة لأغراض الاتصالات، وفى مادتي Al Ga In P/ Ga As، اللاتى تستعمل فى نبيطات توليد ليزر الأطوال الموجية المرئية. أما إذا انعدم توافق الشبيكات المعنية، تنشأ الانخلاعات والعيوب البلورية عند سطح التقاء الوصلة غير المتجانسة وتظهر معها مراكز إعادة التثام غير مشعة ويستحيل تولد الليزر منها.

ويمكن تلخيص المتطلبات الأساسية للحصول على النبيطة DHLD

- ١ - ركيزة مناسبة من بلورة أحادية تبنى عليها المادة المتليزرة.
- ٢ - تقنية إتمام بلورى مناسبة لإتمام الطبقة الفعالة وطبقتى الغطاء.
- ٣ - مواد مناسبة بينهما توافق شبيكى، مع تمييز طبقتى الغطاء بفجوة طاقة كبيرة ومعامل إنكسار أصغر مما لدى الطبقة الفعالة.
- ٤ - مصدر إشابة مناسب للإمداد بطبقات الارتداد من الأنواع n, p وتسمح بحقن كلا من الإلكترونات والشفرات إلى داخل الطبقة الفعالة.
- ٥ - تقنية مناسبة لعمل وصلات فلزية تثبت على مواد النبيطة كأقطاب لتحمل تيارا كهربيا ذا كثافة عالية.

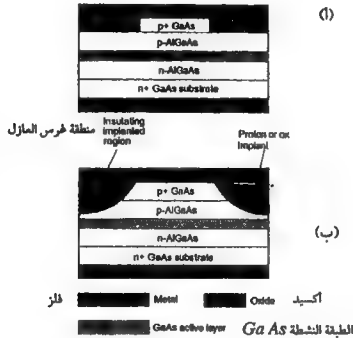
وقد يتوقع المرء أن تقل كثيرا قيمة عتبة التيار المحفز لليزر نتيجة حصر كل من حاملات الشحنة والفوتونات، إلا أن ذلك لا يحدث عمليا. بل تظل هذه العتبة كبيرة للغاية؛ لذلك لزم إجراء المزيد من التعديلات على النبيطة المذكورة بهدف اختزال قيمة تيار العتبة وهذا ما أدى إلى نبيطة ثنائي الليزر الشريطى ونبيطة ليزر الوصلة غير المتجانسة المدفونة.

(٨-١٥) الليزر الشريطى

The Stripe Laser Diode

تتميز نبيطات الليزر التى ورد ذكرها بمساحات عرضية واسعة، تتحدد بحواف النبيطة، لحقن التيار. يؤدي تقليص هذه المساحة إلى اختزال التيار المحقون داخل النبيطة

DHLD كما يوضحه شكل (٨ - ٣٤) ففي الشكل (أ) يتحقق ذلك بتصميم نافذة محددة في طبقة الأكسيد يتم خلالها حقن التيار. وفي الشكل (ب) يتحقق ذلك بعمل إتلاف إشعاعي عند حواف شبه الموصل في النبيطة، فتتحول المساحات النافذة إلى مادة عازلة وتبقى المساحة المركزية لحقن التيار. وفي أى من هاتين الطريقتين يقل حجم المادة الفعالة للتليزر ويقل تبعاً لذلك التيار اللازم. ويلاحظ في النبيطة أن الفوتونات لم تقيد في الاتجاهات المستعرضة فيمكنها أن تنتشر انتشاراً مستعرضاً خلال المناطق التي لم يتم الضيخ فيها بالطبقة الفعالة. ويؤدي حصر الفوتونات في هذه الرقعة ووقف انتشارها المستعرض إلى تحسين أداء النبيطة وهذا ما تم تحقيقه في نبيطة الوصلة غير المتجانسة المدفونة.



شكل (٨ - ٣٤) ثنائي الليزر الشريطي

(أ) تصميم ذو نافذة محددة في طبقة الأكسيد.

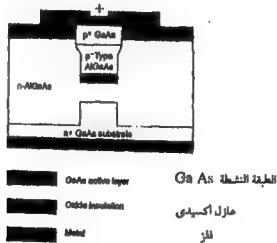
(ب) تكوين نافذة تعمل إتلاف إشعاعي عند حواف شبه الموصل.

(١٦.٨) ليزر الوصلة غير المتجانسة المدفونة

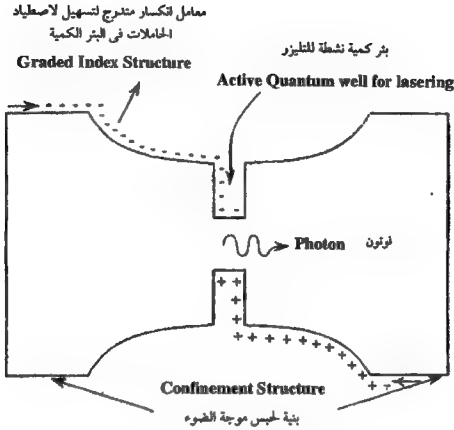
يبين الشكل (٨ - ٣٥) تركيباً لهذه النبيلة وفيها يتم دفن الطبقة الفعالة GaAs داخل مادة Al Ga As ، معامل انكسارها يقل عما لدى الطبقة الفعالة. التي تحيط بها من كل جهة. يؤدي اختلاف معامل الانكسار والذي يبلغ 0.2 إلى حصر الفوتونات في حيز ضيق للغاية. وهذا بدوره يعمل على توليد حزمة ليزرية ذات كفاءة عالية جداً تفوق ما يتولد من النبيلة السابقة. كما تقل قيمة تيار العتبة لتصل إلى 10 mA ويزداد التردد المولف (معدل نبضات الضوء) ليصل إلى 2 GHz.

هذه الخصائص مجتمعة جعلت من هذه النبيلة أداة مثلى تستخدم في عديد من التطبيقات منها أنظمة الاتصال بالألياف البصرية ومسجل الأقراص المدمجة وطابعات الليزر.

وهكذا تم إلقاء الضوء على نبائط الليزر ذات الأبعاد العادية المألوفة في حدود $100\ \mu\text{m}$ طولياً، $10\ \mu\text{m}$ عرضياً مع طبقة فعالة تقدر سمكها بالميكرون. وقد يصل الأمر إلى اختزال سمك الطبقة الفعالة إلى ما هو أقل من ذلك وهذا بدوره سيغير قليلاً من طول موجة الضوء الصادر ويصبح الأمر غير محكوم بفجوة طاقة الطبقة الفعالة وندخل بذلك إلى مجال آخر يعرف بليزرات البئر الكمى، شكل (٨ - ٣٦). وأكثر من ذلك إذا تم اختزال الأبعاد المستعرضة إلى $5\ \mu\text{m}$ أو أقل فإننا نحصل على ما يعرف



شكل (٨ - ٣٥) نبيلة ليزر الوصلة غير المتجانسة المدفونة



شكل (٨-٣٦) ليزر البئر الكمومي وفيه يتم اختزال
سمك الطبقة الفعالة إلى أقل من الميكرون

بليزرات السلك المكواة وفيه ينتشر الليزر في بعددين بدلا من بعد واحد ومن بين الفوائد الهائلة التي سوف تجلبها أمثال تلك النماذج هو اختزال تيار التحفيز إلى الميكرو أمبير أو أقل بحيث يتم اندماج أشعة ليزرية متميزة بكفاءة عالية باستخدام قدرة كهربية منخفضة، ونظرا لضخامة سعة المعلومات التي يمكن نقلها بالضوء فيصبح أهم التطبيقات الواردة. في هذا المجال هو تداول المعلومات المختلفة في سرعة ويسر وتتحقق الدفعة القوية لسيطرة تقنيات جديدة في الفوتون وسيطر على مناحي الحياة إلا أنه مهما يكن سرعة أداء التقنيات المرتقبة فإنها تظل بعيدة عن قدرات الخالق الجبار الآية: ﴿يَعْلَمُ مَا يَلْجِ فِي الْأَرْضِ وَمَا يَخْرُجُ مِنْهَا وَمَا يَنْزِلُ مِنَ السَّمَاءِ وَمَا يَعْرُجُ فِيهَا وَهُوَ الرَّحِيمُ الْغَفُورُ﴾ (سبا).

(٨-١٧) ملخص الفصل

يختلف هذا الفصل عن باقي فصول الكتاب فى التفاعل بين الضوء وحاملات الشحنة الكهربائية.

تعرضنا أولا لنبيطة LED الثنائى الباعث للضوء، وهو عبارة عن ثنائى وصلة $p-n$ فى انحياز أمامى. عندما تلتئم فيه الإلكترونات مع الشغرات ينبعث الضوء. ثم درسنا المواد اللازمة لتصنيفه.

ثم تناولنا الكواشف المبنية على الموصلية الضوئية وهى ببساطة نبائط $p-i-n$ والتى فيها تتغير الموصلية الكهربائية عند سقوط الضوء عليها. يكون كسب الكاشف عاليا إذا كان زمن التثام حاملات الأقلية أكبر من زمن الانتقال. وهذا يسمح للإلكترون أن يعبر النبيلة دون أن يلتئم مع شغره.

ثم تعرفنا على الترانزيستور الضوئى والمبنى على تقنية BJT. التيار الناتج عن الحاملات المتولدة فى القاعدة يمكن تكبيره لإنتاج كاشف بكسب عال.

من أحد التطبيقات الهامة لنبيطات الإلكترونات البصرية هو الخلية الشمسية وهى ثنائى $p-n$ يعمل بدون انحياز خارجى. حيث يتسبب الضوء الساقط فى توليد جهد وتيار كهربى من الخلية وتتحوّل بذلك الطاقة الضوئية إلى كهربية.

وفى النهاية قدّمنا نبيلة أخرى هامة على المستوى التكنولوجى وهو ثنائى الليزر. فالفوتونات المتولدة فى وصلة $p-n$ بانحياز أمامى تُقيد داخل تجويف ضوئى. وتُنتج بعض أنماط الفوتونات لتنمو بواسطة الفجوة بينما تخمد الأنماط الأخرى. والأنماط المختارة تسمح بانبعث مستحث يولد إشارات ضوئية مترابطة.

واختتم الفصل بتعريف بعض نبائط الليزر على بنىات شبه موصلة فائقة الصغر مثل الآبار الكمية والأسلاك والنقط الكمية.

أسئلة الفصل

١ - موصل صوتي من Ga As من النوع n ، طول $25 \mu m$ ومساحة مقطعه $10^{-6} cm^2$. فيه زمن بقاء حاملات الأقلية $10^{-6} s$. أثر على الموصل بجهد قدره $5 V$. احسب الكسب بفرض ثبات قيم الشحنة. علما بأن حركية الإلكترون $\mu_n = 8000 cm^2/V.s$ وحركية الشفرة $\mu_p = 1000 cm^2/V.s$.

٢ - استنتج تعبيراً للتيار الضوئي I_L في وصلة p قصيرة لثنائي فيه اتساع الرقعة n (W_n) أقل بكثير من طول انتشار الشفرة L_p وكذلك اتساع الرقعة p (W_p) أقل بكثير من طول انتشار الإلكترون L_n . ومعدل تولد حاملات الشحنة G_L ومساحة مقطع النبيلة S .

٣ - خلية شمسية سيلكونية n^+p ، مساحة مقطعها $1 cm^2$ فيها:

$$\begin{aligned} \tau_n &= 4 \times 10^{-7} s, & N_A &= 2 \times 10^{17} cm^{-3} \\ G_L &= 2.7 \times 10^{19} cm^{-3} s^{-1}, & D_n &= 5 cm^2 s^{-1} \end{aligned}$$

احسب جهد الدائرة المفتوحة.

٤ - يمكن الحصول على أقصى قدرة من خلية شمسية بإيجاد القيمة العظمى لحاصل الضرب IV . بين أن تعظيم القدرة يؤدي إلى:

$$\left(1 + \frac{q V_m}{kT} \right) e^{(q V_m / kT)} = 1 + \frac{I_{sc}}{I_{th}}$$

حيث V_m هو الجهد عند أقصى قدرة، I_{sc} تيار الدائرة المقصورة، I_{th} تيار التشبع العكسي المستحث حرارياً.

٥ - اكتب مقالا عن ليزر أشباه الموصلات موضحاً أهم الفروق بين نبيلة ليزر الوصلة المتجانسة وليزر الوصلة غير المتجانسة مع شرح لمعاني التعبيرات التالية:
ليزر البئر الكمي - ليزر السلك الكمي - ليزر النقطة الكمية.





ملحق

ملحق (أ) الوحدات

Quantity	Unit	Symbol
----------	------	--------

Fundamental Units:

Length	Meter	m
Time	Second	s
Mass	Kilogram	kg
Temperature	Degree Kelvin	K
Current	Ampere	A
Light intensity	Candela	Cd

Additional Units

Angle	Radian	rad
Solid angle	Radian	rad

Other Named Units

Frequency	Hertz	Hz	(1/s)
Force	Newton	N	(kg m/s ²)
Energy	Joule	J	(Nm)
Pressure	Pascal	Pa	(N/m ²)
Power	Watt	W	(J/s)
Electric charge	Coulomb	C	(A s)
Potential	Volt	V	(J/C)
Resistance	Siemens	S	(A/V)
Capacitance	Farad	F	(C/V)
Magnetic flux	Weber	Wb	(V s)
Inductance	Henry	H	(Wb/A)
Magnetic induction	Tesla	T	(Wb/m ²)
Light flux	Lumen	Lm	(Cd rad)

ملحق (ب) الثوابت الطبيعية

Quantity	Symbol	Value
Avogadro number	N_{AV}	6.0221367×10^{23} 1/mol
Bohr energy	E_B	13.6060 eV
Bohr magneton	μ_B	5.78832×10^{-5} eV/T
Bohr radius	a_B	0.52917 Å
Boltzmann constant	k_B	1.38066×10^{-23} J/K
Boltzmann constant/ q	k_B/q	8.61738×10^{-5} eV/K
Electronic charge	q	1.60218×10^{-19} C
Electronvolt	eV	1.60218×10^{-19} J
Fine structure constant	α	0.00729735308 ($\approx 1/137$)
Gas constant	R	1.98719 cal mol ⁻¹ K ⁻¹
Gravitational constant	γ	6.67259×10^{-11} m ³ /(kg s ²)
Impedance of free space	$1/\epsilon_0 \mu_0 c$	376.732 Ω
Mass of electron at rest	m_e	$0.91093897 \times 10^{-30}$ kg
Mass of proton at rest	M_p	$1.6726231 \times 10^{-27}$ kg
Permeability in vacuum	μ_0	1.26231×10^{-8} H/cm ($4\pi \times 10^{-9}$)
Permittivity in vacuum	ϵ_0	8.85418×10^{-12} F/m ($1/\mu_0 c^2$)
Planck constant	h	$6.6260755 \times 10^{-34}$ J-s
Reduced Planck constant	$\hbar = h/(2\pi)$	$1.0545727 \times 10^{-34}$ J-s
Speed of light in vacuum	c	2.99792458×10^8 m/s
Thermal voltage at 300 K	$k_B T/q$	0.025860 V
Wavelengths of visible light	λ	0.4 to 0.7 μm

ملحق (ج) خواص بعض أشباه الموصلات

PROPERTIES OF SILICON (SI)

Atomic number	14
Atoms/cm ³	5.02×10^{22}
Electronic shell configuration	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
Atomic weight	28.09
Crystal structure	Diamond
Breakdown field (V/cm) ^a	$\sim 3.0 \times 10^5$
Density (g/cm ³)	2.329 (at 298 K)
Dielectric constant	11.7
Diffusion constant (cm ² /s) (at 300 K) ^a	37.5 (electrons) 13 (holes)
Effective density of states	
in the conduction band (cm ⁻³)	3.22×10^{19} (at 300 K)
in the valence band (cm ⁻³)	1.83×10^{19} (at 300 K)
Effective electron mass (in units of m_e)	longitudinal : 0.92 (at 1.26 K) transverse : 0.19 (at 1.26 K) density of states : 1.28 (at 600 K) 1.18 (at 300 K) 1.08 (at 77 K) 1.026 (at 4.2 K)
Effective hole mass (in units of m_e)	heavy hole : 0.537 (at 4.2 K) heavy hole : 0.49 (at 300 K) light hole : 0.153 (at 4.2 K) light hole : 0.16 (at 300 K) density of states : 0.591 (at 4.2 K) 0.62 (at 77 K) 0.81 (at 300 K)
Electron affinity (V)	4.05
Energy gap (eV)	1.12 (at 300 K) 1.17 (at 77 K)
Index of refraction	3.42
Intrinsic carrier concentration (cm ⁻³)	1.02×10^{10} cm ⁻³ (at 300 K)
Intrinsic Debye length (μm)	24
Intrinsic resistivity (ohm-cm)	3.16×10^5 (at 300 K)
Lattice constant (Å)	5.43107 (at 298.2 K)
Melting point (°C)	1412
Mobility (cm ² /V-s) (at 300 K)**	1450 (electrons) 500 (holes)
Optical phonon energy (eV)	0.063
Specific heat (J/g-°C)	0.7
Thermal conductivity (W/cm-°C)	1.31 (at 300 K)
Thermal diffusivity (W/cm-°C)	0.9
Thermal expansion, linear (°C ⁻¹)	2.6×10^{-6} (at 300 K)
Young's modulus (dyn/cm ²)	1.9×10^{12} in [111] direction

From K. Lee, M. Shur, T. Fjeldly, and T. Ytterdal, *Semiconductor Modeling for VLSI*, copyright © Prentice Hall, 1993, reproduced by permission of Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.

^a For undoped or low doped material.

PROPERTIES OF GALLIUM ARSENIDE (GaAs)

Crystal structure	zinc blende
Breakdown field (V/cm)	-4.0×10^5
Density (g/cm ³)	5.3176 (at 298 K)
Dielectric constant (κ_s)	12.9 (at 300 K)
(κ_o)	10.89 (at 300 K)
Diffusion constant (cm ² /s) (at 300 K)	207 (electrons) 10 (holes)
Effective density of states	
in the conduction band (cm ⁻³)	4.7×10^{17} (at 300 K)
in the valence band (cm ⁻³)	7.0×10^{18} (at 300 K)
Effective electron mass (in units of m_e)	0.067 (0 K) 0.063 (300 K)
Effective hole mass (in units of m_e)	heavy hole : 0.51 (at $T < 100$ K) : 0.50 (at 300 K) light hole : 0.084 (at $T < 100$ K) : 0.076 (at 300 K)
	density of states : 0.53
Electron affinity (V)	4.07
Energy gap (eV)	1.424 (at 300 K) 1.507 (at 77 K) 1.519 (at 0 K)
Index of refraction	3.3
Intrinsic carrier concentration (cm ⁻³)	2.1×10^6 (at 300 K)
Intrinsic Debye length (μm)	2,250 (at 300 K)
Intrinsic resistivity (ohm-cm)	10^8 (at 300 K)
Lattice constant (\AA)	5.6533 (at 300 K)
Melting point ($^{\circ}\text{C}$)	1,240
Mobility (cm ² /V-s)	8,500 (electrons at 300 K) 400 (holes at 300 K)
Optical phonon energy (eV)	0.035
Specific heat (J/g- $^{\circ}\text{C}$)	0.35
Thermal conductivity (W/cm- $^{\circ}\text{C}$)	0.46
Thermal diffusivity (W/cm- $^{\circ}\text{C}$)	0.44
Thermal expansion, linear ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	6.86×10^{-6} (at 300 K)

From K. Lee, M. Shur, T. Fjeldly, and T. Ytterdal, *Semiconductor Modeling for VLSI*, copyright © Prentice Hall, 1993, reproduced by permission of Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.

ملحق (د) ثوابت مختصرة لأشباه الموصلات الهامة

Properties of Ge, Si and GaAs at 300K

Property	Ge	Si	GaAs
Atomic/molecular weight	72.6	28.09	144.63
Density (g cm^{-3})	5.33	2.33	5.32
Dielectric constant	16.0	11.9	13.1
Effective density of states			
Conduction band N_C (cm^{-3})	1.04×10^{19}	2.8×10^{18}	4.7×10^{17}
Valence band N_V (cm^{-3})	6.0×10^{18}	1.02×10^{19}	7.0×10^{18}
Electron affinity (eV)	4.01	4.05	4.07
Energy gap, E_g (eV)	0.67	1.12	1.43
Intrinsic carrier concentration, n_i (cm^{-3})	2.4×10^{13}	1.5×10^{10}	1.79×10^6
Lattice constant (\AA)	5.65	5.43	5.65
Effective mass			
Density of states m_i^*/m_0	0.55	1.18	0.068
m_i^*/m_0	0.3	0.81	0.56
Conductivity m_e/m_0	0.12	0.26	0.09
m_e/m_0	0.23	0.38	
Melting point ($^{\circ}\text{C}$)	937	1415	1238
Intrinsic mobility			
Electron ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{sec}^{-1}$)	3900	1350	8500
Hole ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{sec}^{-1}$)	1900	480	400



معجم المصطلحات إنجليزي - عربي



المصطلح	الترجمة
abrupt junction	وصلة مبتورة
absorption coefficient	معامل الامتصاص
acceptors	مستقبلات
accumulation	تراكم (تكسس)
active biasing mode	نمط التحياز نشط
alkali ions	أيونات قلوية
alloys	سبائك
aluminum gallium arsenide	ألومنيوم زرنيخيد الجاليوم
amorphous	أمورفي
amorphous - si	سيليكون أمورفي
amphoteric dopant	شاذبة أمفوتيرية
amplification factor	معامل الكسب
antimony (sb)	أنتيمون
antireflection coating,	طلاء غير عاكس
asymmetrical junction	وصلة غير متماثلة
Auger	أوجيه
Auger recombination	التكاثم أوجيه
avalanching	الانهمار
band bending	الحناء نطاق
band gap	فجوة نطاق
band-to-band	نطاق لنطاق

barrier heights	حائط (الجهد)
base	قاعدة
base transit time	زمن عبور قاعدة
base transport factor	معامل الانتقال قاعدة
basic postulates	فرضيات أساسية
bcc	مكعب متمركز الجسم
bias voltage	جهد التحياز
bipolar junction transistor.(bjt)	ترانزستور ثنائي القطب الموصل
blackbody radiation	إشعاع جسم أسود
Bohr atom model	نموذج ذرة بوهر
bonding model	نموذج روابط
breakdown	انهيار
breakdown voltage	جهد الانهيار
built- in voltage	جهد مبيت
buried junction	طبقة مدفونة
c-v characteristics	منحنيات مميزة سعة - جهد
capacitance	سعة
capture coefficients	معاملات الاصطياد (الأسر)
carriers	حاملات
carrier population	إسكان حاملات
carrier properties	خواص الحاملات
CdS photoconductor	موصل ضوئي من كبريتيد الكاديوم
channel conductance	ناقلية قناة
charge density	علاقة تماثل الشحنة
chemical vapor deposition (CVD)	ترسيب بخار كيميائي
collector	مجمع
collector current	تيار المجمع

common base	قاعدة مشتركة
common collector	مجمع مشترك
common emitter	باعث مشترك
compensated	معوض
compensated semiconductor	شبه موصل معوض
composition	تكوين
compound semiconductors	أشباه موصلات مركبة
compounds	مركبات
concentration calculation	حسابات التركيز
concentration formulas	صيغ التركيز
conductance	مواسلة (ناقلية)
conduction band	نطاق توصيل
conductivity	توصيلية
confinement	حبس (تقييد) (حصر)
continuity equations	معادلات الاتصال
core electrons	إلكترونات القلب - (القلب)
core,atomic	اللب (القلب) الذري
covalent bonding	رابطة تساهمية
crystal growth	تنمية بلورية
crystal lattices	شبيكات بلورية
crystalline	بلوري
current density	كثافة التيار
current diffusion	تيار الانتشار
cutoff biasing mode	نمط التحيز لقطع
cutoff frequency	تردد القطع
Czochralski method	طريقة تشوكراسكي
defect	عيب

definition	تعريف
degenerate	مفككة
degenerate semiconductor	شبه موصل مفكك
degenerate states	حالات مفككة
density of states	كثافة الحالات
depletion	نضوب
depletion approximation	تقريب نضوب
depletion mode	نمط نضوب
depletion region	منطقة (رقعة) نضوب
depletion width	اتساع النضوب
depletion- layer capacitance.	سعة طبقة نضوب
diamond	ماسى
diamond lattice	شبكة ماسية
die	قالب
dielectric constant	ثابت العزل الكهربى
diffusion	انتشار
diffusion capacitance	السعة الكهربائية للانتشار
diffusion coefficients	معامل الانتشار
diffusion length	أطوال الانتشار
direct	مباشرة
direct semiconductor	شبه موصل مباشر
dislocation	الخلاعات
dopant	مالحات
doping	إشابة (تطعيم)
doping profile	بروفيل (شكل جانبى) الإشابة
dose	جرعة
drain	مصرف

drift	انسياب
drift velocity	سرعة انسياب
drive-in	دفع للدخال
dry	جافة
dry etch	حفر
e-k plots	منحنيات E-k (الطاقة كدالة في عدد الموجة)
eddy current	تيارات دوامية
effective density of states	كثافة الحالات الفعالة
effective mass	كتلة فعالة
Einstein relationship	علاقة أينشتاين
electric field	مجال كهربى
electron affinity, 478-565	اللفة إلكترون
electron volt(ev)	إلكترون- فولت
elemental	عنصر مفرد
emitter	باصت
emitter current	تيار الباصت
emitter efficiency	كفاءة الباصت
energy band diagram	مخطط نطاق الطاقة
enhancement mode mosfet	نمط (مقوى) محسن
epitaxy	نمو متراس
equations of state	معادلات الحالة
equilibrium conditions	شروط الاتزان
evaporation	تبخير
extrinsic	مكتسبة (هرضية)
extrinsic semiconductor	شبه موصل مكتسب
extrinsic temperature region	منطقة حرارية مكتسبة
fcc	مكعب متمركز الوجه

fcc unit cell	خلية وحدة متمركزة الوجه
Fermi energy	طاقة فيرمي
Fermi function	دالة فيرمي
Fermi level	مستوى فيرمي
Fermi-dirac integral	تكامل فيرمي - دايرك
Fermi-level pinning	تثبيت مستوى فيرمي
Fick,s law	قانون فيك
field effect	تأثير المجال
field emission	النبعاث بالمجال
fill factor	معامل الملىء
fingers	اصابع
flat band	نطاق مسطح
forward bias	الحياز امامى
four-point probe	مجس النقاط الأربع
freeze-out	الطرد بالتجميد
Ga N	نتريد الجاليوم
Ga P	فوسفيد الجاليوم
gain	كسب (تكبير او تضخيم)
gallium arsenide (gaus)	زرنخيد الجاليوم
gallium(ga)	جاليوم
gate	بوابة
germanium(ge)	جرمانيوم
graded field	وصلة مدرجة
heterojunction	وصلة غير متجانسة
heterojunction bipolar	ترانزستور ثنائى القطب غير متجانس الوصلة
holes	شغرات
homojunction laser	ليزر وصلة متجانسة

hot-point, probe	مجس (مسبار) النقطة الساخنة
hydrogen atom	ذرة الهيدروجين
IV characteristics	مميزات I-V
ideal diode equation	شبه موصل غير مباشر
ideal laser characteristic	المتحنى المميز لليزر مثالي
indexing procedure	طريقة الإدلال، أدلة ميللر
indirect	غير مباشرة
indirect semiconductor	صبة (مصهور)
ingot	تركيز الحاملات الذاتية
injection	حقن
intrinsic	ذاتي
intrinsic	ذاتية
intrinsic carrier concentration	مستوى فيرمي الذاتي
intrinsic fermi level	شبه موصل ذاتي
intrinsic temperature region	المنطقة الحرارية الذاتية
inversion	القلاب
inversion layer	طبقة القلاب
inverted biasing mode	نمط التحياز معكوس (مقلوب)
ion implantaion	قرس أيوني
isoelectronic trap	مصيدة لتساوي إلكتروني
junction capacitance	سعة وصلة
junction field effect transistor (JFET)	ترانزستور تأثير المجال وصلي
laser	ليزر
laser amplifier	مكبر ليزر
laser oscillator	مذبذب ليزر
lasing	تليزر
lattice	هبيكة

lattice constant	ثابت شبكية
lattice-matched system	منظومة شبكية متوافقة
light emitting diode.	ثنائى باعث للضوء
lithography	نقش حجرى
low-level injection	حقن منخفض المستوى
majority carriers	شحنات الأغلبية
masks	قناع
mean free time	زمن حر متوسط
metallurgical junction	وصلة ميتالورجية
metastable	شبه مستقر
metastable	ضعيف الاستقرار
Miller directions	اتجاهات أدلة ميلر
Miller indices	أدلة ميلر
minority carrier diffusion equations	معادلات انتشار حاملات اقلية
minority carrier diffusion lengths	اطوال انتشار حاملات اقلية
minority carrier lifetime	زمن بقاء (حياة) حاملات اقلية
minority carriers	شحنات الاقلية
mobility	حركية
modulation doped	إشابة معدلة
molecular beam epitaxy (MBE)	نمو متراس بالشعاع الجزيئى
momentum	كمية حركة
n^+ - material	مادة نوع n^+
n-type material	مادة نوع n
narrow - base diode	ثنائى ضيق القاعدة
nearest neighbors	اقرب جيران
nondegenerate	غير مضككة
nondegenerate semiconductor	شبه موصل غير مضكك

notch	حز
np product	حاصل الضرب np
ohmic contact	تلامس أومي
open circuit voltage	جهد دائرة مفتوحة
optical communication	اتصالات بصرية
optical fibers	اللياف بصرية
oxidation	أكسدة
p^+ - material	مادة p^+
p-type material	مادة نوع p
Pauli exclusion principle	مبدأ استبعاد باولي
periodic table	جدول دوري
perturbation	قلقلة (اضطراب)
phonon	فونون
photo detectors	كواشف ضوئية
photoconductor	موصل ضوئي
photocurrent	تيار ضوئي
photodetector	كاشف ضوئي
photodiode	دايود ضوئي
photogeneration	توليد ضوئي
photon	فوتون
photoresist	مقاوم ضوئي
phototransistor	ترانزستور ضوئي
pinch-off	قطع تخطري
pn junction	وصلة pn
point defect	عيب نقطي
polycrystalline	متعدد البلورة
polycrystalline si (polysilicon)	سيليكون متعدد البلورة

polysilicon emitter	باعث متعدد التبلور
polysilicon emitter (BJT)	باعث متعدد السيليكون
population	إسكان (تعداد)
population density	كثافة إسكان
population inversion	إسكان مقلوب
potential	جهد
potential energy	طاقة جهد
predeposition	قبل الترسيب (ترسيب مسبق)
primitive unit cell	خلية وحدة أولية
projected range	مدى إسقاطي
pumping	ضخ
punch- through	اختراق كلي
purity	نقاء
quantization concept	مفهوم الكم
quantum mechanics	ميكانيكا الكم
quantum-well laser	ليزر بئر كمى
quasi-fermi levels	أشياء مستويات فرمى
R-G center (indirect)	مركز (R - G) (غير مباشر)
recombination-generation (R- G)	التلام (إعادة التلام) توليد
refractive index	معامل انكسار
resistivity	مقاومية
reverse bias	انحياز عكسى
ruby laser	ليزر الياقوت
saturation	تشبع
scattering	تشتت (استظارة)
Schottky	شوتكى
Schottky barrier lowering	حاجز شوتكى

Schrodinger wave equation	معادلة موجة شرودنجر
seed crystal	بذرة بللورة
semiconductor laser	ليزر شبه موصل
semiconductors	أشباه موصلات
sheet resistivity	مقاومية صفحية
short circuit current	تيار دائرة مقصورة
silicon (Si)	سيليكون
silicon purification	تنقية السيليكون
simple cubic	مكعب بسيط
single crystal formation	تكوين بلورة أحادية
solar cell	خلية شمسية
solar spectral irradiance	استضاءة طيفية شمسية
space charge region	منطقة شحنة فراغية
sputtering	نفث
static characteristic	منحنيات مميز ساكنة
steady state	حالة مستقره
stimulated emission	إشعاع مستحث (محفز)
structure	بنية
substrate	ركيزة
temperature dependence	اعتمادية على درجة الحرارة
textured surface	سطح منمض
thermal motion	حركة حرارية
three-level system	منظومة ثلاثية المستويات
threshold current	تيار العتبة
total current	تيار كلي
transconductance	ناقلية متعديّة
transistor	ترانزستور

transistor parameters	وسائط (بارامترات) الترانزيستور
ultraviolet	فوق بنفسجية
unit cell	خلية وحدة
vacuum micro electronics	إلكترونيات دقيقة مفرغة
valence band	نطاق التكافؤ
valence electrons	إلكترونات التكافؤ
velocity, saturation	تشبع سرعة
wafer	رقاقة
wet	مبتلة
xenon flash lamp	مصباح وميض الزينون
Zener - breakdown	إنهيار زينر
zincblende	زئكبلند
zincblende unit cell	خلية وحدة زئكبلند



كشاف المصطلحات

رقم الصفحة	المصطلح
٢٩	اتجاهات أدلة ميللر
٢٤٣	اقصاع النضوب
٢٨٢	اتصالات بصرية
٢٧٧	اختراق كلي
٣١ - ٣٦	أدلة ميللر
٣٧٣	استضاءة طبيعية شمسية
٣٨٤	إسكان (تمداد)
٣٨٣	إسكان حاملات
٣٨٧ - ٣٨٣	إسكان مقلوب
٦٣ - ٥٦	إشابة (تعليم)
١٦٢، ١٥٨	أشياء مستويات فرمى
١٩ - ١٧	أشياء موصلات مركبة
٣٧٣	إشعاع جسم أسود
٣٨٣	إشعاع مستحث (محفز)
٣٧٤	أصابع
١٥٧	أطوال الانتشار
١٥٧	أطوال انتشار حاملات الأقلية
٨٧، ٦٨، ٦٠	اعتمادية على درجة الحرارة
٤٢، ٣٦	القرب جيران
١٧٨ - ١٧٥	أكسدة
١٤٣ - ١٢٦	التنام (إعادة التنام) توليد

١٢٩	التكامل أوجيه
٢٦٠	السعة الكهربائية للانتشار
٨٩، ٨٨	الطرز بالتجميد
٤٢	أنفة إلكترون
٤٤	إلكترونيات التكافؤ
٤٦، ٤٤، ٤٣	إلكترونيات القلب - (القلب)
٢٩٣، ٢٩٢	إلكترونيات دقيقة مفرقة
٤٣	اللب (القلب) النرى
٣٩٠	المنحنى المميز لليزر مثالي
٨٩، ٨٨	المنطقة الحرارية الناقية
٥٩، ٥٦، ١٩	ألومنيوم
٣٩١، ٣٥١، ٢٤٨، ٢٥٠، ٢٤، ١٧	ألومنيوم زركونيوم الجاليوم
٣٩٥	أنفاق بصيرة
٣٨١، ٣٧٨، ٢٠	أصوري
٣٩٢	النبعث بالبحال
١٢٦ - ١٢٠، ١١٥	انتشار
٣٧٩، ٥٩، ٥٦، ١٩	أنثيمون
١١٠	الحناء لحلق
٢٢٩، ٢٢٨، ٢٢٦، ٢٢٥	الحيال أصامي
٢٢٨، ٢٢٦، ٢٢٤	الحيال عكسي
٣٩٣	الخطامات
٥٩، ٥٦، ١٩	إندروج
١٠١ - ١٠٠	انسياق
١٠٩ - ١٠٨	الانقاط الأربع (مجس)
٢٨١	انقلاب
٣٨٦، ٢٨٣، ٢٤٠	انهمار
٢٣٩	انهيال

٢٤٠	الهيبارزينر
١٢٧ - ١٢٩	أوجيه
٢٥١	باعث
٢٨٦	باعث متعدد التباور
٢٨٦	باعث متعدد السيليكون
٢٥٣	باعث مشترك
٢٣	بنزرة بللورة
١٨٥، ١٨٢، ١٨١	بروفيل (شكل جانبي) الإضافة
٦١	بريلسيوم
٢١	بنزوي
٢١	بنية
٣١٣، ٣١٢، ٣١١	بوابة
٥٩، ٥٦، ٢٤، ١٩	بورون
٣٦٤ - ٣٦١	تأثير المجال
١٩١، ١٩٠	تبخير
٢٠٦	تثبيت مستوى فيرمي
٣٦٧، ٣٦٦	ترانزستور ضوئي
٢٥٩، ٣٢٥١	تراكم (تكلس)
٣٠٤، ٣٠٣، ٣٠٢	ترانزستور
٣٣٠ - ٣٢٩، ٣٢٨	ترانزستور تأثير المجال، موصل
٢٧٤	ترانزستور ثنائي القطب، الموصل
٢٨٤	ترانزستور ثنائي القطب، شير متجانس الوصلة
٣٦٧، ٣٦٦	ترانزستور ضوئي
٢٧٤	تردد القطع
١٩٤ - ١٩٢	ترسيب بخر كيميائي
٨١ - ٧٨، ٥٥	تركيز الحاملات الذاتية
٢٨١، ٢٣٦	تضيق

١٠٠	تشبع سرعة
١٠٤، ١٠٢، ١٠١	تشبت (استطارة)
٩٩	تعريف
٢١١	تقريب فضوب
٧٤	تكامل فرمى - دايترك
١٩ - ١٧	تكوين
٣٣	تكوين بلورة احادية
٢٠٤ - ٢٠١	تلامس اوسى
٣٩٣، ٣٨٩	تليزر
٣٢	تنقية السيليكون
٣٣، ٣١	تنمية بلورة
١٤٣، ١٤٢، ١٠٦	توصيلية
٣٦٨، ١٣٥، ١٣٤، ١٣٠	توليد ضوئى
٢٧٥	تيار الباهث
٣٩٠	تيار العتبة
٢٥٥	تيار المجمع
١٢٠	تيار انتشار
٣٧٧، ٣٧٠	تيار دائرة مقصورة
٣٤١	تيار ضوئى
١٦٤ - ١٢١	تيار كلئى
١٠٩	تيارات دوامية
٦١، ١٩	تيلوريوم
٢٧٨، ٥٨	ثابت العزل الكهربى
٢٥، ٢١	ثابت شبكية
٣٤٩ - ٣٤٢	ثنائى باعث للضوء
١٧٨ - ١٧٥	جافة
١٩	جنول دورى

١٨٣	جرمة
٣٥٧، ٢٣٩، ١٩	جرمانيوم
٢١٤، ٢٣١، ٢١١	جهد
٢٣٩	جهد الانهيار
٢٢٦، ٢٢٣	جهد التحياز
٣٧٧، ٣٧٠	جهد دائرة مفتوحة
٢٢٠، ٢٠٨	جهد ميبت
٢٢٦، ٢١٩	حاجك (الجهد)
٣٨١، ٣٧٩	حاجز شوكلي
٧٧	حاصل الضرب BP
٩٩٩	حالات مفككة
٤٩	حالة مستقرة
٥١ - ٤٩، ٤١	حاملات
٣٩٥ - ٣٩١	حبس (تقييد) (حصر)
٩٩	حركة حرارية
١٠٥ - ١٠٠	حركية
٢٧، ٢٦	حز
٨٣ - ٨٠	حسابات التركيز
٣٧٤، ١٨٩	حفر
٣٩٢، ٣٨٩	حقن
١٣٧، ١٣٦	حقن منخفض المستوى
٣٧٦، ٣٧٣، ٣٧١، ٣٦٨	خلية شمسية
٢٦ - ٢١	خلية وحدة
٢٣	خلية وحدة أولية
٢٥ - ٢٤	خلية وحدة زيكبلند
٢٥، ٢٣	خلية وحدة متمركزة الوجه
٢٢ - ٥٢	خواص الحاملات

٧٠ - ٦٥	دالة فرضي
٣٤٢	دايود ضوئي
١٨٢ - ١٨١	دفع للدخل
٨٧، ٦٧، ٥٥	ذاتي
٢٨١	ذرة الهيدروجين
١٢٠، ٤٤	رابطه تساهمية
١٩	رصاص
٢٧	رقاقة
٢٠٢	رعيمة
١٩	زئبق
٥٩، ٥٦، ١٩	زرنيخ
٣٩٣، ٣٤٩	زرنخيد الجاليوم
٦١، ١٩	ذلك
٢٦٣، ١٤٣ - ١٣٩	زمن بقاء (حياة) حاملات اقلية
١٠٢	زمن حر متوسط
٢٧٠	زمن عبور قاعدة
٢٥، ٢٤	زئبيلند
١٩ - ١٨	سيالك
١٠١ - ٩٩	سرعة السياق
٣٧٦	سطح منمش
٢٤٣	سعة
٢٤٥، ٢٤٣	سعة طبقة نضوب
٢٦١، ٢٤٣	سعة وصلة
٣٥٧، ٧٩، ٧٨، ٦١، ٥٧، ٢٦، ١٩	سيلنيكون
٣٧٨	سيلنيكون امورفي
٢٨٦	سيلنيكون متعدد البلورة
١٩	سيلينيوم

٦١	شائبة أمفوليرية
٣٨٤	شبه مستقر
٨٧، ٦٢، ٥٥	شبه موصل ذاتي
١٣١	شبه موصل غير مباشر
٨٦، ٨٥، ٧٥	شبه موصل غير مفكك
٣٤٢، ١٣٨، ١٣٣	شبه موصل مباشر
٨٢	شبه موصل معوض
٧٦، ٧٥	شبه موصل مفكك
٦٢	شبه موصل مكتسب
٣١، ٢٢	شبيكات بلورية
٢٦، ٢١	شبيكة
٢٥، ٢٤	شبيكة ماسية
٢٣٤	شحنات الأغلبية
٢٣٥، ٢٣٣	شحنات الأقلية
١٢٣	شروط الاتزان
٢٥٨	شفرات
٣٧٩	شوتكي
٣٤، ٣٣	صبة (مصبور)
٨٣-٨١	صنغ التركيز
٣٨٧	صنخ
٢٨٤	ضعيف الاستقرار
٧٠٨	طاقة جهد
٢٠٨، ٢٠٦، ١٨-٦٥	طاقة فيرمي
٢٨٣	طيفة انقلاب
٣٩٥، ٣٩٣	طيفة منظونة
٢٨، ٢٧	طريقة الإدلال، أدلة ميللر
٣٤، ٣٣	طريقة تشوكراسكي

١٢٤ - ١٢٣	علاقة أينشتاين
١٨، ١٧	متنصر مفرد
٥١	عوازل
١٢٨، ٤٥	عيب
٤٥	عيب نقطى
١٨٦ - ١٨٠	خرس أبولوى
١٣١	غير مباشرة
٧٦، ٧٥	غير مفككة
٢٠٦، ٥٢، ٥٠، ٤٨، ٤٦	فجوة نطاق
٣٨٣ - ٣٦٨، ٣٤١، ١٣٣، ١٣٢	فوتون
٥٩، ٥٧، ٥٦	فوسفور
٣٥٧، ٣٥١	فوسفيد الجاليوم
١٣٢	فوتون
٢٥١	قاصة
٢٥٣	قاصة مشتركة
١٩٦	قائب
١٢٠	قانون فيلك
١٨٦، ١٨١	قيل الترسيب (ترسيب مسبق)
١٩	قصدير
٣٢١، ٣١٧، ٣١٦	قطع تخصيري
١٣٧، ١٣٦	قلقلة (اضطراب)
١٩٥، ١٨٩، ١٨٨	قناع
٣٦٤، ٣٥٥، ٣٤٢	كاشف ضوئى
١٩	كادميوم
١٩	كبريت
٥٤ - ٥٢	كتلة فعالة
٣٨٤، ٣٨٣	كثافة إسكان

٩٩، ٢٣٦، ٢٣٥	كثافة التيار
٦٩، ٦٥، ٦٣	كثافة الحالات
٧٤	كثافة الحالات الفعالة
١٩	كربون
٢٦٥، ٢٥٧	كسب (تكبير أو تضخيم)
٢٦٨، ٢٦٧	كثافة الباشت
٢٦٧	كثافة الباشت
١٣٢ - ١٣٠	كمية حركة
٣٥٥	كواشف ضوئية
٢٨٢	ليزر
٢٨٩، ٢٨٧	ليزر الياقوت
٢٩٦	ليزر بلر كمي
٢٨٢	ليزر شبه موصل
٢٨٨	ليزر وصله متجانسة
٣٧٩، ٤٦	مادة p^+
٢٠٣، ٧١، ٦٣	مادة نوع n
٣٧٩، ٤٦	مادة نوع n^+
٧١، ٦٣	مادة نوع p
٢٥، ٢٤	مامي
٨٠، ٦٣ - ٥٦	مانحات
١٣١	مباشرة
١٧٨ - ١٧٥	مبتلة
٤٦	مبدأ استبعاد باولي
٢٠	متعدد البلورة
٢١٨، ٢١٤، ٢١٣، ٢١١	مجال كهربي
١٢٠، ١١٩	محس (مستطير) النقطة الساخنة
٢٥١	مجمع

٢٥٣	مجموع مشترك
٥١ - ٤٥	مخطط نطاق الطاقة
١٨٥	مدى إسقاطي
٣٨٧	متنبذ ليزر
١٩ - ١٧	مركبات
١٣٣، ١٢٩ - ١٢٨	مركز (R - G)
١٤٠ - ١٣٦	مركز (R - G) (غير مباشر)
٢٠٣، ١٨٠، ١٧٠، ٥٦	مستقبلات
٢٠٢، ٦٨ - ٦٥	مستوى فيرمي
٨٤، ٧١	مستوى فيرمي الثاني
٣٨٦	مصباح زيتون ويض
٣١٥، ٣١٤، ٣١٢	مصروف
٣٥٠	مصيدة تساوي إلكتروني
١٤٦ - ١٤٤	معادلات الإيصال
٢١٠	معادلة بواسون
١٤٨، ١٤٣	معادلات الحالة
١٤٦ - ١٤٩	معادلات الانتشار حاملة أقلية
٢٣٦، ٢٣٠	معادلة الثلاثي الثاني
٢١١	معادلات ماكسويل
٣٥٩، ١٣٦، ٣٤	معامل الامتصاص
١٢٥ - ١٢٠، ٢٣٥	معامل الانتشار "
٢٥٧	معامل الكسب
٣٧٢، ٣٧١	معامل المليء
٢٧١، ٢٧٠، ٢٦٨	معامل الانتقال قاعدة
٣٨٨	معامل انكسار
١٣٩، ١٣٨	معاملات الاصطيد (الأسر)
٨٢	معوض

٦١، ١٩	مغنسيوم
٧٦ - ٧٥	مفكك
٤٤ - ٤١	مفهوم الكم
١٨٩، ١٨٨	مقاوم ضوئي
١١٠ - ١٠٥	مقاومية
١٠٩	مقاومية مصفحة
٣٨٧	مكبر ليزر
٦٢	مكتسبة
٢٣، ٢٢	مكعب ويسيك
٢٤، ٢٣	مكعب متمركز الجسم
٢٥، ٢٣	مكعب متمركز الوجه
٣٧٢	مميزات I-V
٣٥١، ٣٥٠، ١٣٣ - ١٣١	منحنيات E - k (الطاقة كدالة في عند الموجة)
٢٧٩، ٢٢٤	منحنيات مميزة ساكنة
٢٤٥	منحنيات مميزة سعة - جهد
٢٠٤	منطقة (رقعة) لضوب
٨٩، ٨٨	منطقة حرارية مكتسبة
١٩٩	منطقة شحنة فراغية
٣٨٦، ٣٨٤	منظومة ثلاثية المستويات
٣٩٣	منظومة شبكة متوافقة
٣٢٠	مواسلة (ناقلية)
٣٦٥، ٣٦٣، ١٧٠، ١٤٠	موصل ضوئي
١٧٠	موصل ضوئي من كبريتيد الكاديوم
٥٣، ٤٣	ميكانيكا الكم
٢٥٦، ٢١٦	ناقلية قناة
٣٢٠	ناقلية متعددة
١٩	لتروجين

٣٤٦	تريد الجاليوم
٢٢١، ٢١٦، ٢١١	نضوب
٤٨، ٤٧	نطاق التكافؤ
٥٠ - ٤٨	نطاق توصيل
١٢٨، ١٢٧	نطاق لنطاق
٣٠٠	نطاق مسطح
١٩١	نفت
١٩	نقاء
١٨٩ - ١٨٦	نقش حجري
٣١١	نمط (مقوى) محسن
٢٨١	نمط الحيال معكوس (مقلوب)
٢٨١	نمط الحيال قطع
٢٨١	نمط الحيال نقش
٣٢٣	نمط نضوب
١٩٣، ١٩٢	نمو متراس
١٩٤	نمو متراس بالشعاع الجزيل
٤٣، ٤٢	نموذج ذرة بوهر
٥٨، ٥٧، ٥٠، ٤٩، ٤٥، ٤٤	نموذج روابط
٢٦٥	وسائط (بارامترات) الترانزستور
٢٠٠، ١٩٩	وصلة pn
٣٧٩، ٢٨٤	وصلة غير متجانسة
٣٩٢، ٣٩١	وصلة غير متماثلة
٢٢١، ٢١٥	وصلة مبتورة
٢١٥	وصلة مندرجة
٢٠٣	وصلة ميتالورجية

المراجع



- 1 - R . F. Pierret, Semicondvctor Device Fundamentals, Addison - Wesley Publishing Company, New York, © 1996.
- 2 - G . Parper, Introductory Semiconductor Device Physics, Prentice Hall, New York, © 1994.
- 3 - A. M, Ferendeci, Physical Foundations of Solid State and Electron Devices, McGraw Hill, New York, © 1991.
4. R.C. Jaeger, Introduction to Microelectronic Fabrication, Vol. V in the Modular Series on Solid State Devices edited by G. W. Neudeck and R.F. Pierret, Addison - Wesley, Reading, MA, © 1988.
5. D.A. Neamen, Semiconductor Physics and Devices, Basic Principles, Irwin, Homewood, IL, © 1992.
6. R.F. Pierret, Advanced Semiconductor Fundamentals, Vol. VI in the Modular Series on Solid State Devices edited by G.W. Neudeck and R.F. Pierret, Addison-Wesley, Reading, MA, © 1987.
7. W.R. Runyan and K.E. Bean, Semiconductor Integrated Circuit Processing Technology, Addison-Wesley, Reading, MA, © 1990.
8. B.G. Streetman, Solid State Electronic Devices, 4th edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, © 1995.
9. S.M. Sze (editor), VSLI Technology, 2nd edition, McGraw Hill, New York, © 1988.
10. M.S. Tyagi, Introduction to Semiconductor Materials and Devices, John Wiley and Sons, New York, © 1991.

11. A. Bar-Lev, Semiconductors and Electronic Devices, 3rd edition, Prentice Hall, Inc., New York, © 1993.
12. D.H. Havon, Semiconductor Microdevices and Materials, Holt, Rinehart and Winston, New York, © 1986.
13. D.L. Pulfrey and N.G. Tarr, Introduction to Microelectronic Devices, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NG, © 1989.
14. C.T. Sah, Fundamentals of Solid-State Electronics, World Scientific, Singapore, © 1991.
15. J. Singh, Semiconductor Devices, an Introduction, McGraw-Hill, New York, © 1994.
16. S.M. Sze, Semiconductor Devices, Physics and Technology, John Wiley and Sons, New York, © 1985.
17. E.S. Yang, Microelectronic Devices, McGraw Hill, New York, © 1988.
18. M. Zambuto, Semiconductor Devices, McGraw Hill, New York, © 1989.

٢٠٠١ / ٢٠٠٣	رقم الإيداع
977-10-1433-4	I. S. B. N التوزيع الدولي

دار الفكر العربى

مؤسسة مصرية للطباعة والنشر والتوزيع

تأسست ١٣٦٥ هـ - ١٩٤٦ م

مؤسسها : محمد محمود الخضرى

الإدارة :

٩٤ شارع عباس العقاد - مدينة نصر - القاهرة

وإدارة التسويق

ت : ٢٧٥٢٩٨٤ - ٢٧٥٢٧٩٤ فاكس : ٢٧٥٢٧٣٥

www.darelfikrelarabi.com

INFO@darelfikrelarabi.com

الإدارة المالية :

١١ ش جواد حسنى - القاهرة

ص. ب : ١٣٠ - الرمز البريدى ١١٥١١

فاكس : ٣٩١٧٧٢٣ (٠٠٢٠٢)

ت : ٣٩٢٠٩٥٦ - ٣٩٢٥٥٢٣

نشاط

١ - طبع ونشر وتوزيع جميع الكتب العربية فى شتى مجالات المعرفة والعلوم

المؤسسة

٢ - استيراد وتصدير الكتب من وإلى جميع الدول العربية والأجنبية.

تطلب جميع منشوراتنا من فروعنا بجمهورية مصر العربية :

فروع مدينة نصر :

٩٤ شارع عباس العقاد - مدينة نصر - القاهرة .

ت ٢٧٥٢٩٨٤ - ٢٧٥٢٧٩٤ فاكس ٢٧٥٢٧٣٥

فروع جواد حسنى :

١٦ شارع جواد حسنى - القاهرة

ت ٣٩٣٠١٦٧

فروع الدقى :

٢٧ شارع عبد العظيم راشد المتضرع من شارع محمد شاهين

- المجورة ت ٣٣٥٧٤٩٨

وكذلك تطلب جميع منشوراتنا من وكيلنا الوحيد بالكويت والجزائر

مؤسسة دار الكتاب الحديث

هذه السلسلة

لقد أضحت أمر تعريب العلم والتعليم ضرورة من ضرورات النهضة العلمية والتقنية التي تشهدها امتنا العربية والإسلامية لكي تستلطف مسيرتها الحضارية بلغة القرآن الكريم الذي حفظها قوية حية في النفوس على الرغم من الوهن الذي أصاب أهلها. وبار الفكر العربي.. من جانبها.. قد استشعرت خطورة تأخير هذا المشروع الحضاري الكبير، فسعت جاهدة إلى تحقيق الهدف النبيل، وشرعت في إعداد سلسلة مراجع العلوم الأساسية، في مجالات الكيمياء والفيزياء والرياضيات والفلك والعلوم الجوية والجيولوجيا وعلوم الحياة، بحيث تغطي قارئ العلوم بصورة عامة، وطلاب المرحلتين الثانوية والجامعية على وجه الخصوص. وقد عهدت بدار الفكر العربي بالمسئولية العلمية إلى هيئة استشارية تتولى التخطيط لإصدار هذه السلسلة، واستكتاب أهل الخبرة والاختصاص من علماء الأمة ومفكرها، ومناقشة الأعمال المقدمة قبل صدورها.

هذا الكتاب

يتوجه محتوى هذا الكتاب، فيزياء أشباه الموصلات، لمخاطبة المهتمين بالالكترونيات عامة وطلاب الهندسة والعلوم والتربية والتكنولوجيا بشكل خاص. وقد كتب باللغة العربية إهداء للمكتبة العربية في هذا المجال من المعرفة. ويشرح الكتاب بطريقة مبسطة ومتدرجة البنية الأساسية لأشياء الموصلات، الذاتية منها والعارضة، وما يحكمها من قوانين فيزيائية، ثم يقدم شرحاً وافياً لنماذج أشباه الموصلات وخصائصها الفيزيائية واستخداماتها. ويتناول بعد ذلك موضوع البصريات الكمية وعناصرها الأساسية من النماذج الكاشفة أو المشعة للضوء والليزر مع بيان للتطبيقات الشائعة في هذا المجال. وقد اختيرت المحتويات لكي تلبي احتياجات مقرر دراسي مرجعي للطلاب الدارسين لهذا الفرع من الفيزياء والقائمين على تدريسه.



أ.د. حسن حسين حسن



أ.د. شريف أحمد خيرى

- * أستاذ مساعد بالمعهد العالى للتكنولوجيا
- * حصل على درجة الدكتوراه
- * للتكنولوجيا بالولايات المتحدة الأمريكية
- * ١٩٨٦ م.
- * عمل بالاسم بالجامعة
- * جامعة القاهرة
- * عمل بالاسم بالجامعة
- * أم القرى بالمملكة
- * السعودية.
- * له أبحاث منشورة في مجال أشباه الموصلات

- * أستاذ الفيزياء - كلية العلوم جامعة القاهرة.
- * سكرتير تحرير المجلة العربية للفيزياء التطبيقية
- * والتعليم، تصدرها الشبكة العربية لتعليم الفيزياء.
- * عضو مجلس إدارة الجمعية المصرية لعلوم الجوامد
- * وتطبيقاتها.
- * أشرف على العديد من رسائل الماجستير والدكتوراه
- * بجامعة القاهرة ونشر العديد من البحوث في مجال
- * فيزياء الجوامد.

تطلب جميع منشوراتنا من وكيلنا الوحيد بالكويت والجزائر دار الكتاب الحديث